

КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Легка Людмила Володимирівна

УДК 373.5.016:[004.4+530.145]

ДИСЕРТАЦІЯ

Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

014 – Середня освіта (Інформатика)

01 – Освіта/Педагогіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Л. В. Легка

Науковий керівник – Шокалюк Світлана Вікторівна, кандидат педагогічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2021

АНОТАЦІЯ

Легка Л. В. Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 014 Середня освіта (Інформатика). – Криворізький державний педагогічний університет МОН України, Кривий Ріг, 2021.

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування й запропоновано методику навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

За результатами аналізу наукової літератури, нормативно-законодавчих документів з'ясовано, що: квантові інформаційні технології у країнах-лідерах технологічного та соціально-економічного розвитку (США, Китай, країни ЄС) визнаються стратегічно важливим міждисциплінарним напрямом, попит на фахівців з якого стрімко зростатиме; Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій, започаткована 2021 року, передбачає навчання квантової інформатики на всіх рівнях освіти, розпочинаючи з початкової школи, що на сьогодні реалізується насамперед за рахунок програм неформальної освіти (окремі курси, майстер-класи, семінари, літні табори та школи); ключові компоненти методичної системи навчання інформатики (а саме цілі, зміст та засоби навчання) потребують уточнення для забезпечення можливості систематизовано навчати основ квантової інформатики учнів ліцеїв, поєднуючи концептуальне та інтуїтивне розуміння концепцій квантової фізики та фізичних основ квантових технологій із методично адаптованими науковими засадами квантових обчислень та моделювання.

Ґрунтуючись на фундаментальних ідеях компетентнісного підходу у навчанні, а також взявши за основу структуру та зміст Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій, визначено ключове поняття дослідження – 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; частинними компетентностями (групами компетентностей) системи 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.

Розроблена модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв складається із таких взаємопов'язаних блоків – цільового (компоненти якого визначають мету формування визначеної системи компетентностей), змістового (компоненти якого відображають основні напрями змісту формування компетентностей з основ квантової інформатики), технологічного (компонентами якого є засоби та платформи навчання квантової інформатики, взаємопов'язані з методами навчання інформатики та формами організації навчальної діяльності учнів з інформатики) та результативного (компоненти якого репрезентують прогнозований результат застосування моделі).

Компонентами моделі, що забезпечують взаємозв'язок усіх блоків, є системний, компетентнісний, інтеграційний та особистісно-діяльнісний методологічні підходи та загальнодидактичні принципи навчання інформатики.

Реалізацію побудованої моделі формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв здійснено в межах факультативного курсу «Основи квантової інформатики», орієнтованого на учнів 10 (11) класів; програму факультативу складено на основі структури та змісту системи компетентностей з основ квантової інформатики з урахуванням результатів експертного опитування; врахувавши критерії добору інструментальних засобів навчання окремих розділів інформатики, основним засобом навчання основ квантової інформатики учнів ліцею обрано платформу IBM Quantum; загальний обсяг для очного (очно-дистанційного або синхронного дистанційного) навчання за програмою факультативу становить 17 годин, а значить може бути рекомендований в якості вибіркового модуля програми з інформатики рівня

стандарту для учнів 10 (11) класів.

Беручи до уваги інтегрованість змісту квантової інформатики – квантова механіка (фізика), квантова теорія інформації, квантова теорія алгоритмів, пропонується три моделі масштабного упровадження методики навчання основ квантової інформатики в освітній процес ліцеїв:

1) модель «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики»;

2) модель «Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики»;

3) модель «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики».

За першою моделлю – «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики» – пропедевтичне вивчення пропонується запровадити в межах програми рівня стандарту обов'язково-вибіркового курсу «Інформатика» для 10 (11) класів обсягом 17 навчальних годин, що повністю відповідає програмі авторського факультативного курсу. Таким чином, з'являється ще одна альтернатива для досить поширеного варіанту вивчення інформатики у профільній (старшій) школі за програмою рівня стандарту – по 1,5 навчальні години інформатики у 10 та 11 класах (обсяг навчальних годин на два роки – 70), що обмежувався обов'язковим вивченням базового модуля (35 навчальних годин), двох 17-годинних (однозначно «Основи електронного документообігу» та «Інформаційна безпека») вибіркових модулів й одного 35-годинного вибіркового модуля («Веб-технології», «Бази даних» тощо).

«Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики» (за другою моделлю упровадження) 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 проєктною назвою «Фізико-математичні основи програмування на квантових комп'ютерах».

За третьою моделлю – «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики» – інваріанте (обов'язкове) пропедевтичне вивчення, більш ґрунтовне (порівняно з першими двома моделями) пропонується обсягом 35 навчальних годин для класів інформаційно-технологічного профілю. Для класів

же математичного, фізичного або фізико-математичного профілів (чи інших профілів природничо-математичного напрямку) даний інтегрований курс може бути рекомендований як курс за вибором.

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.

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.

Матеріали дослідження, його результати та висновки можуть бути використані для масштабного упровадження методики навчання основ квантової інформатики в освітні процеси ліцеїв, а також у практики підготовки/перепідготовки вчителів інформатики, фізики та/або відповідних інтегрованих предметів.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у тому, що:

– вперше теоретично обґрунтовані та розроблені: 1) зміст, критерії, показники та засоби діагностики сформованості компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв; 2) модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв; 3) методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв;

– удосконалено методику навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти III ступеня через використання моделей та засобів квантової інформатики;

– набули подальшого розвитку проблеми трансформації змісту шкільного курсу інформатики з урахуванням розвитку інформаційних технологій і комп'ютерної техніки.

Практичне значення результатів дослідження визначається готовністю розробленої методики до використання в освітньому процесі, зокрема, шляхом розробки навчально-методичного комплексу у складі навчальної програми факультативного курсу «Основи квантової інформатики», матеріалів до уроків та самостійної роботи (теоретичні відомості, система задач для практичного виконання, тести для діагностики рівня сформованості компетентностей із основ квантової інформатики), методичних рекомендацій для вчителів з навчання основ квантової інформатики.

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

Ключові слова: методика навчання інформатики, загальна середня освіта, методика навчання учнів ліцеїв, квантові технології, квантова інформатика, компетентності з основ квантової інформатики.

ABSTRACT

Lehka L. V. Methods of teaching the basics of quantum informatics to lyceums students. – Qualifying research paper on the rights of manuscript.

The dissertation submitted for scientific degree of Doctor of Philosophy) on specialty 014 Secondary education (Informatics). – Kryvyi Rih State Pedagogical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2021.

In the thesis, the theoretical justification is presented and the methods of teaching the basics of quantum informatics of lyceums students are offered.

According to the results of the analysis of scientific literature, normative-legislative documents, they found that: quantum information technologies in the

leading countries of technological, economic and social development (USA, China, EU) are recognized as strategically important interdisciplinary field, in which there is a growing demand for staff with specialist skills; European Competence Framework for Quantum Technologies, established in 2021, provides for the teaching of quantum informatics at all levels of education, beginning from primary school, which is currently implemented primarily through non-formal education programs (individual courses, workshops, seminars, camps and schools); key components of the methodical system of teaching informatics (namely goals, content and teaching tools) need to be clarified to provide an opportunity to teach systematically the basics of quantum informatics to lyceums students, combining conceptual and intuitive understanding of quantum physics and physical basics of quantum technologies, with methodically adapted scientific principles of quantum calculations and modeling.

Based on the fundamental ideas of the competence approach in teaching, as well as using as a basis a structure and content of the European Competence Framework for Quantum Technologies, the key concept of research is defined – competencies in quantum informatics to lyceums students – as dynamic combinations of knowledge, skills, abilities, ways of thinking, views, other personal qualities in the quantum technologies, that determine a person's ability to pursue successfully further professional and / or educational activities using quantum technologies; partial competencies (competencies groups) in the basics of quantum informatics to lyceums students are physical and mathematical foundations of quantum technologies, enabling technologies, hardware for quantum computers and sensors, quantum computing and simulation, quantum sensors and metrology, quantum communication, practical and soft skills.

The developed model of formation of competencies in the basis of quantum informatics to lyceums students consists of the following interrelated blocks – target (which components determine the purpose of competencies forming), content (which components show the main dispatches of content formation of competencies in the basics of quantum informatics), technological (which components are tools and platforms of teaching quantum informatics, interrelated with methods of teaching informatics and forms of organization of educational activities of students in computer

science) and efficient (which components represent the predicted result of the using the model).

The components of the model that ensure the interconnection of all blocks are systemic, competency, integrative and personal-activity methodological approaches and general didactic principles of teaching informatics.

Implementation of the constructed model of competencies formation in the basics of quantum informatics of lyceums students was implemented within the optional course «Basics of Quantum Informatics», oriented towards the students of 10 (11) grades; the elective program is based on the structure and content of competencies in the basics of quantum informatics, given the results of expert surveys; considering the selection criteria of training teaching tools of certain sections of informatics, the main means of teaching the basics of quantum informatics of lyceums students was chosen IBM Quantum platform. The total amount for full-time (full-time or synchronous distance) study in the elective program is 17 hours, so it can be recommended as an optional module of the standard level informatics program for students of 10 (11) grades.

Considering the integration of the content of quantum informatics - quantum mechanics (physics), quantum information theory, quantum theory of algorithms, there are proposed three models of large-scale implementation of methods of teaching the basics of quantum informatics in the educational process of lyceums:

- 1) model «Elective module» Basics of Quantum Informatics»;
- 2) model «Cross-cutting study of the basics of quantum informatics in the physics, mathematics and informatics courses»;
- 3) model «Integrated course «Basics of Quantum Informatics».

According to the first model – «Elective module «Basics of Quantum Informatics» – propaedeutic study is proposed to be introduced within the standard level of the compulsory elective course «Informatics» for 10 (11) grades with 17 hours, which fully corresponds to the author's elective course. Thus appears another alternative for a common enough option for studying informatics in the profile (senior) school on the standard level program – 1.5 hours of informatics in 10th and 11th grades (the number of hours for two years – 70), which is limited to the compulsory study of

the basic module (35 teaching hours), two 17-hour (clearly «Basics of Electronic Document Management» and «Information Security») optional modules and one 35-hour optional module «Web Technology», «Databases» etc.).

«Cross-cutting study of the basics of quantum informatics in physics, mathematics and informatics courses» (according to the second model of implementation) is proposed by including to the programs, especially profile level, listed subjects of cross-cutting (general, public) educational section (5-6 teaching hours amount) with the project title «Physical and mathematical basics of programming on quantum computers».

According to the third model – «Integrated course «Basics of Quantum Informatics» – invariant (compulsory) propaedeutic study, deeper (compared to the first two models) is offered in the amount of 35 teaching hours for information-technological profile. For mathematical, physical or physical-mathematical profiles (or other natural sciences and mathematics profiles), this integrated course can be recommended as an elective course.

Regardless of the choice of an experimental model of propaedeutic study of quantum informatics, the main goal of its implementation should be the development of computer literacy and information culture through the acquisition of basic theoretical knowledge and practical skills to manage quantum computers as next-generation computers.

Experimental verification of the developed methodology in the form of a consistent pedagogical experiment and statistics of the obtained data confirmed the research hypothesis that the formation of lyceums students' competencies in the basics of quantum informatics at a high level is possible with changes in individual components of the methodological system of teaching informatics: content and teaching tools.

The research materials, its results and conclusions can be used for large-scale implementation of methods of teaching the basics of quantum informatics in educational processes of lyceums, as well as in the practice of training / retraining of teachers of informatics, physics and / or relevant integrated subjects.

The scientific novelty of the research results is that:

– for the first time justified and developed theoretically: 1) content, criteria, indicators and tools for diagnosing the formation of competencies in the basics of quantum informatics of lyceums students; 2) model of formation of competencies in the basics of quantum informatics of lyceums students; 3) methods of teaching the basics of quantum informatics of lyceums students;

– the method of teaching informatics in general secondary education institutions of the third degree was improved through the use of models and tools of quantum informatics;

– have further developed the problem of transforming the content of school and computer science courses, taking into account the development of information technology and computer technology.

The practical significance of the research results is determined by the readiness of the developed methodology for use in the educational process, in particular, by developing an educational and methodological complex as part of the elective course program «Basics of Quantum Informatics», materials for lessons and independent work (theoretical information, a system of tasks for practical implementation, tests to diagnose the level of formation of competencies in the basics of quantum informatics), methodological recommendations for teachers to teach the basics of quantum informatics.

The study does not exhaust all aspects of the analyzed problem. Further scientific research of its solution is feasible in the following areas: design of partial methods of competence formation in the quantum technologies field in accordance with the European framework; integrated teaching of quantum physics and informatics for students of scientific lyceums; the use of immersive media for the development of virtual manipulative quantum technologies; development of methods for teaching the basics of quantum technology to students of professional lyceums.

Keywords: methods of teaching informatics, general secondary education, methods of teaching lyceums students, quantum technologies, quantum informatics, competencies in the basics of quantum informatics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Легка Л. В. Пропедевтика вивчення квантової інформатики у профільній (старшій) школі / Л. В. Легка, С. В. Шокалюк, Є. Ю. Богуненко // Фізико-математична освіта. – 2021. – Том 28. – № 2. – С. 51–56. – DOI : 10.31110/2413-1571-2021-028-2-009. **(фахова, індексовано в Index Copernicus)**

2. Легка Л. В. Основи квантових технологій у закладах загальної середньої освіти: обумовленість та забезпеченість / Л. В. Легка // Освітній дискурс. – 2021. – Випуск 35 (7). – С. 61–72. – DOI : 10.33930/ed.2019.5007.35(7)-6 **(фахова)**

3. Lehka L. V. Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to lyceums students / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Educational Dimension. – 2021. – Issue 4 (56). – P. 102-121. – DOI : 10.31812/educdim.v56i4.4440. **(фахова)**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Lehka L. V. Quantum programming is a promising direction of IT development / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Computer Science & Software Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018), Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018 / Edited by : Arnold E. Kiv, Serhiy O. Semerikov, Vladimir N. Soloviev, Andrii M. Striuk. – P. 76–82. – (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2292). – Access mode : <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper07.pdf>. **(індексовано в Scopus)**

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

5. Легка Л. В. Поточний стан і перспективи розвитку методичної системи навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти України / Людмила Легка // Збірник наукових праць здобувачів вищої освіти Криворізького державного педагогічного університету (приурочено до 90-річчя КДПУ) / Міністерство освіти і науки України, Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг, 2020. – С. 67–70.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ НАВЧАННЯ ОСНОВ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ УЧНІВ ЛІЦЕЇВ	21
1.1. Квантова інформатика як перспективний напрям розвитку інформаційних технологій	21
1.2. Досвід навчання квантової інформатики в Україні та світі	30
1.3. Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв	36
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ НАВЧАННЯ ОСНОВ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ УЧНІВ ЛІЦЕЇВ	61
2.1. Еволюція та сучасний стан розвитку методичної системи навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти	61
2.2. Модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв	80
2.3. Апаратно-програмні засоби навчання основ квантової інформатики ..	103
2.4. Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв	112
2.4.1. Методика навчання змістової лінії «Фізичні та математичні основи квантової інформатики»	116
2.4.2. Методика навчання змістової лінії «Квантові обчислення, алгоритмізація та програмування»	127
2.4.3. Методика навчання змістової лінії «Квантові телекомунікаційні технології»	151
2.5. Експериментальна перевірка методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв	157
Висновки до розділу 2	169
ВИСНОВКИ	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	175

ДОДАТКИ	198
Додаток А Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій (переклад українською).....	198
Додаток Б Форма експертного опитування «Зміст навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв»	203
Додаток В Вивчення думки вчителів інформатики закладів загальної середньої освіти про актуальність і доцільність введення основ квантової інформатики.....	219
Додаток Г Витяги з навчальних програм для 5-11 класів	223
Додаток Д Пам'ятка з основ структурного програмування мовою Python .	234
Додаток Е Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	237
Додаток Ж Довідки про упровадження результатів дослідження	239
Додаток К Критерії та показники рівнів сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв	243
Додаток Л Дорожня карта авторської методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв	249
Додаток М Вхідне тестування-опитування слухачів факультативного курсу «Основи квантової інформатики»	255
Додаток Н Технологічна карта уроку № 5 з основ квантової інформатики.	260

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У рекомендаціях UNESCO стосовно структурування ІКТ-компетентностей учителів [52] вказані конкретні технологічні інновації, які станом на 2018 рік суттєво впливають на всі аспекти та рівні сформованості ІКТ-компетентностей учителів: відкриті освітні ресурси, соціальні мережі, мобільні технології, інтернет речей, штучний інтелект, віртуальна та доповнена реальність, великі дані, програмування, етика та захист конфіденційності. Зміни апаратного забезпечення обчислювальних систем, пов'язані із поширенням квантових інформаційних технологій, справляють революційний вплив на:

– *програмування*: виникає потреба застосування нового класу алгоритмів – квантових, переходу від бітів до кубітів, від детермінованого до ймовірнісного виконання програм тощо;

– *роботу з великими даними*: квантові алгоритми надають можливість зниження обчислювальної складності та, як результат, радикального прискорення дій з їх опрацювання;

– *розв'язання задач штучного інтелекту*: квантові та квантово покращені алгоритми машинного навчання надають можливість зниження обчислювальної складності при опрацюванні даних ймовірнісної природи;

– *інформаційну безпеку*: алгоритми квантової криптографії та відповідні канали передавання даних створюють умови для переходу до нового рівня захищеності та забезпечення конфіденційності.

Квантові інформаційні технології суттєво впливають на зв'язки інформатичної освітньої галузі із визначеними в Державному стандарті базової середньої освіти [141] ключовими компетентностями, не лише інформаційно-комунікаційної, а й:

– математичної – поглиблюється роль методів та моделей теорії ймовірностей та математичної статистики для розв'язання задач засобами квантових цифрових технологій;

– у галузі природничих наук, техніки і технологій – виникає потреба у проведенні навчальних досліджень та експериментів природничо-технологічного змісту за допомогою квантових цифрових технологій, а також визначення загальних фізичних принципів їх будови і функціонування;

– інноваційності – виникає потреба у формуванні готовності розпізнавати та описувати поширення квантових цифрових інновацій у науці і суспільстві, інтегрувати знання із різних предметних галузей;

– соціальних – створюються умови для переходу на новий рівень захисту себе і цифрових пристроїв від типових кіберзагроз та ін.

Питання квантової інформатики в інформатичній освітній галузі відображаються в базових знаннях про:

а) інформаційні процеси й системи (квантова теорія інформації; опрацювання квантових даних; роль квантових технологій і даних у житті людини; кодування й декодування повідомлень; квантові моделі й моделювання);

б) комп'ютер (види сучасних квантових комп'ютерних систем і їх застосування; історія квантових комп'ютерних пристроїв; апаратна і програмна складові квантової інформаційної системи; складові квантових комп'ютерів, їх технічні характеристики і призначення; квантові комп'ютерні мережі);

в) програмне забезпечення (класифікація квантового програмного забезпечення; інформаційна безпека у квантових системах);

г) Інтернет (квантові хмарні сервіси);

д) алгоритми і програми (квантові алгоритми; виконавці квантових алгоритмів, системи команд виконавців квантових алгоритмів; способи опису квантового алгоритму; середовище опису й виконання квантових алгоритмів; квантова програма; сучасні мови квантового програмування).

Робота квантових комп'ютерів описується математичним апаратом квантової фізики, методичні основи навчання якої для учнів закладів загальної середньої освіти (ЗЗСО) розроблені В. І. Баштовим [63] (застосування мисленнєвого експерименту), М. Є. Бершадським [64] (формування теоретичних

узагальнень), С. Ш. Кабакановою [95] та О. А. Немих [123] (формування квантових уявлень), Л. Д. Костенко [101] (диференційоване навчання основ квантової фізики), В. П. Муляром [119] (застосування ІКТ у навчанні квантової фізики), С. І. Терещуком [168] (навчання квантової фізики у ліцеї), І. І. Тимченко [170] (моделювання у навчанні квантової фізики).

Сучасна школа повинна надавати знання, що актуальні не лише для сьогодення, а й на далеку перспективу. Значущими складовими мети освіти є всебічний розвиток людини, її інтелектуальних та творчих здібностей, формування цінностей і компетентностей, необхідних для її успішної самореалізації, підвищення освітнього рівня громадян задля забезпечення сталого розвитку України [131]. Це зумовлює випереджальний і інноваційний характер освіти та необхідність її модернізації на основі системного, методично обґрунтованого впровадження основ квантової інформатики в інформатичну освітню галузь. Переконливим свідченням такої необхідності є спільна робота Національного фонду досліджень та уряду США із «квантової трансформації» шкільної освіти. Зокрема, у 2020 році були визначені 9 ключових концепцій квантової інформатики як навчальної дисципліни: квантова інформатика, квантовий стан, вимірювання у квантовій системі, кубіт, сплутаність, когерентність, квантові комп'ютери, квантова комунікація та квантове панування [27]. Реалізація цієї трансформації у рамках National Q-12 Education Partnership спрямована на те, щоб «... упродовж наступного десятиліття співпрацювати із американськими вчителями з метою створення потужного квантового середовища навчання, розпочинаючи від надання засобів для розробки практико зорієнтованих навчальних матеріалів і закінчуючи спрямуванням на професії в галузі квантових технологій. ... Разом ми можемо підготувати нову генерацію американських професіоналів, озброєних засобами досягнення успіху в індустрії майбутнього» [36].

Огляд джерел з проблеми дослідження надав можливість виокремити такі протиріччя:

– між значущістю опанування квантової інформатики у ліцеї для

підвищення конкурентоспроможності та успішної самореалізації випускників закладів загальної середньої освіти III ступеня 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 у ЗЗСО;

– між необхідністю формування в учнів ліцеїв компетентностей з основ квантової інформатики та нерозробленістю відповідної методики.

Актуальність досліджуваної проблеми, її недостатня розробленість у педагогічній теорії та практиці, а також необхідність розв'язання виокремлених протиріч зумовили вибір теми дисертаційної роботи: **«Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв»**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано в Криворізькому державному педагогічному університеті відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри інформатики та прикладної математики в межах комплексної теми «Синергетичні методи моделювання, проектування та прогнозування складних систем природного і штучного походження». Уточнену тему затверджено Вченою радою Криворізького державного педагогічного університету (протокол № 1 від 31 серпня 2021 року).

Об'єкт дослідження – навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти III ступеня.

Предмет дослідження – методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати, розробити та експериментально перевірити методику навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Гіпотеза дослідження – 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.

Відповідно до мети й гіпотези визначено такі основні **завдання дослідження:**

1. Проаналізувати джерела з проблеми навчання квантової інформатики.
2. Теоретично обґрунтувати та розробити структуру та зміст компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв.
3. Розробити модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв.
4. Розробити методичні засади навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв.
5. Експериментально перевірити ефективність розробленої методики у формуванні компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Експериментальна база дослідження. Дослідно-експериментальна робота проводилась упродовж 2018 – 2021 рр. на базі Криворізької загальноосвітньої школи I-III ступенів № 90, Криворізької загальноосвітньої школи I-III ступенів № 1 та Криворізької спеціалізованої школи № 9 з поглибленим вивченням економіки, права та іноземних мов. До експерименту було залучено 45 учнів закладів загальної середньої освіти III ступеня та 3 вчителів інформатики.

Методи дослідження – теоретичні (аналіз джерел з проблеми дослідження, синтез компонентів методичної системи навчання основ квантової інформатики, моделювання системи задач з навчання основ квантової інформатики) та емпіричні (експертне опитування з метою добору змісту навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв; педагогічний експеримент з метою визначення ефективності розробленої методики).

Наукова новизна результатів дослідження полягає у тому, що:

– *вперше* теоретично обґрунтовані та розроблені: 1) зміст, критерії, показники та засоби діагностики сформованості компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв; 2) модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв; 3) методика навчання основ квантової

інформатики учнів ліцеїв;

– *удосконалено* методику навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти III ступеня через використання моделей та засобів квантової інформатики;

– *набули подальшого розвитку* проблеми трансформації змісту шкільного курсу інформатики з урахуванням розвитку інформаційних технологій і комп'ютерної техніки.

Практичне значення результатів дослідження визначається готовністю розробленої методики до використання в освітньому процесі, зокрема, шляхом розробки навчально-методичного комплексу у складі навчальної програми факультативного курсу «Основи квантової інформатики», матеріалів до уроків та самостійної роботи (теоретичні відомості, система задач для практичного виконання, тести для діагностики рівня сформованості компетентностей із основ квантової інформатики), методичних рекомендації для вчителів з навчання основ квантової інформатики.

Результати дослідження **впроваджено** в освітній процес Криворізької загальноосвітньої школи I–III ступенів № 1 (довідка № 836а від 04.10.2021); Криворізької спеціалізованої школи № 9 з поглибленим вивченням економіки, права та іноземних мов (довідка № 563/1 від 13.10.2021); Криворізької загальноосвітньої школи I–III ступенів № 90 (довідка № 01-07/236 від 18.10.2021).

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в розкритті змісту навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв [110], порівняльному аналізі апаратних засобів реалізації квантових обчислень [29].

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дослідження доповідались та обговорювались на наукових конференціях і семінарах різного рівня: *Міжнародних: 1st Student Workshop Computer Science & Software Engineering (CS&SE@SW 2018)* (Кривий Ріг, 2018); II Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті та науці»

(Мелітополь, 2021); на засіданнях і семінарах кафедри інформатики та прикладної математики Криворізького державного педагогічного університету (Кривий Ріг, 2018 – 2021 рр.), на семінарах спільної науково-дослідної лабораторії з питань використання хмарних технологій в освіті Криворізького національного університету та Інституту інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України (Кривий Ріг, 2019 – 2021 рр.).

Публікації. Основні результати дослідження відображено у 5 працях, із яких 2 – одноосібні; 3 статті опубліковано в наукових фахових виданнях України, 1 – у виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus, 1 стаття – в іншому виданні.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, двох розділів, висновків, списку використаних джерел (177 найменувань, серед яких 56 – англійською), 11 додатків. Робота містить 31 таблицю та 32 рисунки. Загальний обсяг дисертації – 269 сторінок.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ НАВЧАННЯ ОСНОВ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ УЧНІВ ЛЦЕІВ

1.1. Квантова інформатика як перспективний напрям розвитку інформаційних технологій

Квантова революція на початку ХХ століття спричинила появу квантової фізики. Завдяки квантовій фізиці були винайдені лазери і транзистори – дві основні технології для створення комп'ютерів, засобів зв'язку, Інтернету, супутникової навігації тощо.

Елементною базою класичних комп'ютерів є інтегральні схеми (комп'ютерні чіпи), що мають модульну структуру. Модулі призначені для здійснення базових операцій (додавання, множення тощо) і містять логічні вентиля або просто вентиля (з англ. gates), що складаються із транзисторів. Транзистор – основний елемент, на якому будуються класичні комп'ютери. Транзистор змінює параметри електричного струму та керує ним, працює як електричний перемикач, що може перебувати у закритому й відкритому станах, тобто пропускати або не пропускати електричний струм. Електричний струм розглядається як напрямлений рух заряджених часток – електронів, а транзистор розуміється як канал, що може пропускати або блокувати рух електронів у певному напрямі. Поєднанням закритих (логічний нуль – класичний біт «0») і відкритих (логічна одиниця – класичний біт «1») станів транзистора у класичній комп'ютерній техніці подаються числа, представлені у двійковій системі числення.

Тенденцію розвитку обчислювальної техніки, починаючи із другої половини ХХ ст., можна схарактеризувати закономірністю, що з часом стала відомою під назвою закон Мура. Г. Е. Мур (Gordon E. Moore), майбутній співзасновник компанії Intel, у 1965 році на прохання журналу Electronics проаналізував технологічні особливості побудови інтегральних схем, їх потужності й вартість за попередні 6 років та спрогнозував темпи технологічного

і економічного розвитку напівпровідникових пристроїв на майбутні 10 років. Г. Е. Мур припустив, що на одній мікросхемі буде 65 000 транзисторів [33]. У статті він сформулював емпіричне правило: за мінімальних витрат на компоненти складність інтегральних схем (кількість транзисторів) збільшується приблизно удвічі за рік. У 1975 році Г. Е. Мур уніс корективи у свій закон, формулювання закону стало таким: кількість транзисторів, що розміщуються на кристалі інтегральної схеми, буде подвоюватися кожні 2 роки до кінця десятиріччя [35].

Для підвищення обчислювальних потужностей процесорів виробники спочатку збільшували їх тактову частоту. Наслідком збільшення частоти є перегрів елементів. Для уникнення даного явища виробники зменшували розміри транзисторів. Так з'явилася характеристика «технологічний процес» (техпроцес) при виготовленні напівпровідників, яка означає розмір транзистора. Техпроцес – це розмір затвора транзистора, тобто довжина каналу, який пропускає або не пропускає через себе струм. Використання меншого техпроцесу зменшує енергоспоживання і, як наслідок, – тепловіддачу. Чим менше транзистор, тем менше він витрачає енергії. Зменшення розміру транзистора зменшує затрати на сировину. Одиниця вимірювання техпроцесу – нанометр (нм). Починаючи з 2009 року, виробники не дотримуються даного визначення техпроцесу [22], тому характеристики обчислювальної техніки у нанометрах, що зараз подаються виробникам, не обов'язково означають розміри затвору (каналу) транзистора: кожен виробник самостійно обирає розміри, що подаються споживачам у нанометрах.

Пошук можливостей розмістити більше транзисторів на обмеженій площі інтегральної схеми призводить до зміни технології будови й виробництва транзисторів. Якщо розміри транзисторів зменшити до розмірів декількох атомів, то опис руху електронів законами класичної механіки буде неможливий. У 2003 році Г. Е. Мур написав, що «жодна експоненціальна зміна фізичної величини не може тривати нескінченно», оскільки на розвиток техніки впливають фізичні обмеження [34]. Зараз використовуються тривимірні

транзистори з каналом, витягнутим у третій вимір – у такий спосіб зменшується товщина каналу й сам транзистор. Зменшити розмір транзисторів на мікросхемі стає все важче і дорожче.

Можливостей сучасних комп'ютерів класичної архітектури (класичних комп'ютерів) для ефективного опрацювання даних великих обсягів під час моделювання нанооб'єктів, біогенетичних систем, когнітивних процесів та інших явищ вже не вистачає навіть за умов спільного використання великої кількості комп'ютерів.

На думку С. С. Денєжнікова [84], сучасний ІТ-ринок перебуває у стані чергового технологічного прориву унаслідок конвергенції:

- нанотехнологій (можливість керування речовиною на атомарному рівні);
- біотехнологій (можливість маніпулювати генами та генетичною інформацією);
- інформаційних технологій (використання засобів комунікації та зв'язку);
- когнітивних технологій (вивчення фундаментальної сутності процесів мислення та їх механізмів).

У серпні 2020 року консалтингова компанія Gartner опублікувала чергову версію своєї кривої розвитку (Hype Cycle) передових технологій [39], 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 [39].

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. За прогнозами учасників саміту «Pioneers of Change» до 2025 року квантові обчислення переростуть своє зародження, і на повну потужність запрацює перше покоління комерційного квантового обладнання для розв'язання реальних задач, зокрема – моделювання складних хімічних реакцій для розробки ліків та речовин із наперед заданими властивостями [56]. Для цього учені повинні вивчати точну структуру молекули з метою визначення її властивостей та розуміння того, як вона буде взаємодіяти з іншими молекулами. На жаль, навіть відносно невеликі молекули надзвичайно складно точно змоделювати за допомогою класичних комп'ютерів засобами квантово-хімічного моделювання, оскільки кожен атом складним чином взаємодіє з іншими атомами, а моделювання, наприклад, білків, потребує точного опису взаємодії тисяч із них. Сьогодні вчені змушені синтезувати молекули, щоб фізично виміряти їх властивості, і кожен цикл удосконалення потребує матеріальних та часових витрат. Вирішення проблем моделювання надскладних систем на молекулярному (атомарному) рівні може бути покладене на квантові комп'ютери, розробкою яких займаються провідні ІТ-компанії світу – IBM, Microsoft, D-Wave, Google, QuTech та інші.

Немає сумнівів у швидких темпах розвитку квантових технологій. Х. Невен (Hartmut Neven), директор лабораторії квантового штучного інтелекту Google, вказує на експоненціальне зростання потужностей квантового обладнання у світі, подібне до закону Мура [18]. Слід розуміти, що квантові комп'ютери ні в якому разі не усунуть класичні, однак стануть незамінними для певного типу задач, розв'язання яких базується на вже відомих квантових алгоритмах – задачі визначення збалансованості функції (алгоритми Дойча-Йожи (Deutsch-Jozsa) і Бернштейна-Вазірані (Bernstein-Vazirani)), тотожності функцій (алгоритм Саймона (Simon's algorithm)), гармонійного аналізу (квантове

перетворення Фур'є (Quantum Fourier Transform)), криптоаналізу (алгоритми Гровера (Grover's Algorithm) та Шора (Shor's Algorithm)), квантової телепортації (алгоритм квантової телепортації (Quantum Teleportation)) та нових (поки що експериментальних).

Поява та розвиток квантового обладнання, зокрема квантових комп'ютерів, призвели до виокремлення нової галузі інформатики – *квантової інформатики*.

Квантова інформатика (quantum information science), за тлумаченням Я. Ванга (Yazhen Wang), вивчає підготовку та контроль квантових станів фізичних систем для цілей передавання та маніпулювання інформацією. До складу квантової інформатики він включає квантові обчислення, квантовий зв'язок та квантову криптографію [54].

Учені дослідницької групи Единбургського університету зазначають, що *квантова інформатика (quantum informatics)* вивчає структуру, поведінку та взаємодію квантових технологій. Центральним напрямком квантових досліджень є перетворення квантової інформації, особливо в її класичну форму і навпаки. Розуміння квантових інформаційних явищ дозволяє використовувати квантові технології для отримання безпрецедентної швидкості й безпеки [1].

У звіті семінару «Key Concepts for Future Quantum Information Science Learners» («Основні концепції для учнів, що в майбутньому вивчатимуть квантову інформатику»), організованому і проведеному National Science Foundation (Національним науковим фондом США), White House Office of Science and Technology Policy (Управлінням науково-технічної політики Білого дому США) та Гарвардським університетом, *квантова інформатика* визначена як захоплююча галузь, яка походить з теорії інформації, інформатики та квантової механіки для опрацювання інформації принципово новими способами [27, с. 2].

Д. Дабберс (Dirk Dubbers) та Г.-Ю. Штйокман (Hans-Jürgen Stöckmann) стверджують, що *квантова інформатика* реалізує такі основні цілі – моделювання фізичних квантових систем, недоступних для звичайних

обчислень; квантові обчислення складних математичних задач; квантовий зв'язок на великі відстані [7].

О. С. Холево тлумачить *квантову інформатику* як нову галузь ІТ досліджень, що вивчає закономірності передавання, опрацювання, перетворення, збереження інформації в системах, що працюють за законами квантової фізики (квантової механіки) [172, с. 5].

О. О. Лебідь, О. Ю. Дейнека, А. В. Рибалко та В. І. Гаращенко зазначають, що *квантовий комп'ютинг* – це нова галузь науки і технології, що надзвичайно швидко розвивається та поєднує в собі розділи фізики, математики, кібернетики та інженерії. Її метою є застосування фундаментальних законів фізики, відкритих у ХХ столітті, для отримання, передавання та опрацювання зростаючих обсягів інформації. Вона повинна забезпечити використання квантових систем для реалізації принципово нових методів передавання повідомлень, обчислень і технологій (квантові канали зв'язку, квантова криптографія, квантовий комп'ютер) [107, с. 3].

Взявши за основу тлумачення класичної інформатики як науки [86, с. 10], під *квантовою інформатикою* будемо розуміти таку міжгалузеву науку, що вивчає закони та прийоми створення, зберігання, відтворення, збирання, опрацювання та передавання класичних та квантових даних за допомогою квантових комп'ютерів, а також принципи функціонування квантових комп'ютерів та методи управління ними. Таким чином, квантова інформатика є узагальненням класичної інформатики.

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

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 [37]. Окремі комерційні дослідження здійснюється за фінансування компаній IBM, Microsoft, Google, Intel та ін.

Так, IBM співпрацює більш як із 140 компаніями з використання квантових технологій, наприклад:

- із JSR Corporation, Mitsubishi Chemical та Keio University досліджують нові способи акумулювання енергії за допомогою квантових обчислень;
- із Mercedes-Benz досліджують майбутнє електромобілів;
- із ExxonMobil вирішують складні енергетичні проблеми [45].

Лідерські позиції в технологічному розвитку, зокрема квантових технологіях, виборює Китай. У 2016 році китайським урядом ухвалено Національний план науково-технічних інновацій до 2030 року [177], а у 2017 році розпочато будівництво Національної лабораторії квантової інформатики з початковим фінансуванням 7 млрд. юанів [4]. Китайський технічний гігант Alibaba здійснює значні інвестиції у власні квантові ініціативи, зокрема запуск сервісу емуляторів квантових обчислень через хмарну платформу [46].

У країнах Євросоюзу:

- з 2018 року почала діяти дослідницька програма The Quantum Technologies Flagship на підтримку фундаментальних квантових досліджень з мінімальним терміном дії 10 років з очікуваним бюджетом 1 млрд. євро [48];
- у червні 2019 року 24 держави взяли участь у підписанні декларації задля дослідження, розвитку та розгортання квантової комунікаційної інфраструктури (quantum communication infrastructure – QCI) для захисту від кіберзагроз [2].

Консорціум QTedu у травні 2021 року опублікував першу версію Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій (European Competence Framework for Quantum Technologies) [17]. Компетентності згруповані за 7 галузями знань та 1 секцією практичних умінь:

1. Концепції квантової фізики.
2. Фізичні основи квантових технологій.
3. Допоміжні технології.

4. Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів і датчики.
5. Квантові обчислення та моделювання.
6. Квантові датчики і метрологія.
7. Квантова комунікація.
8. Практичні навички та ключові компетенції.

QTEdu вказує, що в перспективі для учнів початкової та середньої школи, а також у процесі підготовки вчителів навчання квантової інформатики може базуватись на її концептуальному та інтуїтивному розумінні [55].

За аналітичними даними Національного інституту стратегічних досліджень (станом на 20 жовтня 2020 року) «Україна перебуває на узбіччі» розвитку проривних технологій, зокрема квантових, що може бути пов'язане, по-перше, із недостатнім держбюджетним фінансуванням наукових досліджень у цілому, по-друге, із «суттєвою невідповідністю професійно-кваліфікаційної робочої сили потребам ринку» [58].

Розвиток квантових обчислень, удосконалення квантового обладнання вказують на те, що кожен керівник бізнес-організації повинен мати базове уявлення про те, як працюють квантові технології, які проблеми вони можуть допомогти вирішити, і як слід підготуватися до того, щоб використовувати їх потенціал [31].

Актуальною стає потреба у фахівцях з квантових технологій, нестача яких вже гальмує розвиток галузі: так, кількість квантових програмістів збільшується, проте їх небагато, тому потреба у підготовці таких кадрів стає актуальною. Віце-президент D-Wave Дж. Хілтон (Jeremy Hilton) наголошує, що потрібно збільшувати кількість квантово грамотних працівників, інвестувати у навчання підлітків, щоб виявляти перспективних молодих людей, розвивати їх здібності у квантових технологіях і створювати кадровий резерв перспективних працівників, що володіють знаннями у квантовій галузі [19].

Уже сьогодні, за даними міжнародного сайту з безкоштовного пошуку вакантних робочих місць Indeed від початку липня 2021 року, пропонується 2337 вакансій з критерієм відбору «квантові обчислення» («quantum computing»),

1368 – «інженер з квантового програмного забезпечення» («quantum software engineer») та 51 – «квантовий програміст» («quantum programmer») [24].

На сайті з розміщення вакансій та пошуку роботи ZipRecruiter (ziprecruiter.com) у липні 2021 року було 156 пропозицій для тих, хто хотів би працювати інженером з квантового програмного забезпечення у провідних компаніях США [25].

У провідних університетах світу діють дослідницькі групи з квантових обчислень, ведеться підготовка докторів філософії в цій галузі та спостерігається тенденція збільшення програм підготовки магістрів з квантових обчислень через збільшення попиту на ринку праці на фахівців цієї галузі, а також започаткування бакалаврських програм [53].

У результаті проведеного огляду перспектив квантових обчислень було визначено наступне:

1. Відповідно до закону Мура, який описує процес експоненційного зростання щільності транзисторів класичних комп'ютерних архітектур, у найближчі 5-10 років можливе досягнення технологічної межі, за якою при подальшій мініатюризації доведеться ураховувати квантові ефекти.

2. Комп'ютери, архітектура яких заснована на роботі елементів із квантовими ефектами, називаються квантовими, а галузь інформатики, що описує опрацювання класичних та квантових даних на квантових комп'ютерах – квантовою інформатикою.

3. Квантові інформаційні технології у країнах-лідерах технологічного та соціально-економічного розвитку визнаються стратегічно важливим міждисциплінарним напрямом, попит на фахівців з якого стрімко зростатиме.

4. Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій, започаткована 2021 року, передбачає навчання квантової інформатики на всіх рівнях освіти, розпочинаючи з початкової школи.

Проведений аналіз поставив питання про те, яким чином навчати основ квантової інформатики учнів ліцеїв, поєднуючи концептуальне та інтуїтивне розуміння концепцій квантової фізики та фізичних основ квантових технологій

із методично адаптованими науковими засадами квантових обчислень та моделювання.

1.2. Досвід навчання квантової інформатики в Україні та світі

Збільшення попиту на світовому ринку праці на квантово грамотних фахівців став однією з причин відкриття в закладах вищої освіти нових квантово орієнтованих освітніх програм.

В Україні також запроваджено освітні програми підготовки фахівців квантової галузі на різних рівнях вищої освіти:

– у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка здійснюється підготовка магістрів за освітньо-науковою програмою «Квантові комп'ютери, обчислення, інформація» (галузь знань: 10 – Природничі науки, спеціальність: 104 – Фізика та астрономія) [136];

– у Львівському національному університеті імені Івана Франка здійснюється підготовка на другому (магістерському) та першому (бакалаврському) рівнях за освітньо-науковою та освітньо-професійною програмами відповідно із однойменною назвою «Квантові комп'ютери та квантове програмування» (галузь знань: 10 – Природничі науки, спеціальність: 104 – Фізика та астрономія) [129; 130].

Заклади вищої освіти в Україні почали впроваджувати вивчення квантових обчислень, квантових комп'ютерів, квантового програмування як окремих дисциплін освітньої програми різних рівнів:

– «Квантові технології в комп'ютерній техніці» у Сумському державному університеті як вибіркова навчальна дисципліна освітньої програми першого рівня вищої освіти для спеціальності 171 – Електроніка [139];

– «Математичні основи квантового комп'ютингу» в Одеському державному екологічному університеті для бакалаврів за напрямом 113 – Прикладна математика [77];

– «Квантові комп'ютери та квантові обчислення» у Львівському національному університеті імені Івана Франка у межах освітньо-наукової програми підготовки магістрів зі спеціальності 122 – Комп'ютерні науки та

інформаційні технології [69];

– «Сучасні проблеми фізики: квантовий комп'ютер» у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на другому рівні вищої освіти для спеціальності 104 – Фізика та астрономія [111];

– «Квантові обчислення і криптографія» у Харківському національному університеті внутрішніх справ на другому рівні вищої освіти для спеціальності 125 – Кібербезпека (Безпека інформаційних та комунікаційних систем) [127];

– «Квантова інформатика» в Одеському національному університеті імені І. І. Мечнікова на другому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія [57];

– «Квантове програмування» у Криворізькому державному педагогічному університеті для здобувачів другого рівня вищої освіти спеціальності 014 – Середня освіта (Інформатика) [162];

– «Квантова біологія» у Криворізькому державному педагогічному університеті для здобувачів другого рівня вищої освіти спеціальності 014 – Середня освіта (Біологія та здоров'я людини) [167];

– «Квантова інформатика» у Криворізькому державному педагогічному університеті для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 014 Середня освіта (Інформатика) [161].

На сайті проєкту QTEdu наведено перелік освітніх програм для різних рівнів освіти, у тому числі для майбутніх учителів фізики та для учнів шкіл [48].

Беручи до уваги зростаючий попит на фахівців квантової галузі, зростання кількості дисциплін квантово орієнтованого змісту в освітніх програмах, а також появу окремих квантово орієнтованих освітніх програм, особливого значення набуває цілеспрямоване формування компетентностей із квантової інформатики на всіх рівнях освіти, у тому числі й шкільної.

Сьогодні учні старшої школи, а також усі охочі опанувати квантову інформатику можуть скористатися відкритими Інтернет-ресурсами – квантовими симуляторами, квантовими комп'ютерами із хмарним доступом та відповідними навчальними матеріалами від провідних ІТ-компаній.

IBM Quantum надає доступ до електронного підручника з квантових обчислень, можливість виконувати на квантових симуляторах квантові алгоритми, побудовані у вигляді схем, за допомогою сервісу IBM Quantum Composer, а за умови нескладної реєстрації – ще й на квантових комп'ютерах IBM Quantum Experience; у IBM Quantum Lab реалізовувати квантові алгоритми мовою квантового асемблера QASM або мовою Python з використанням бібліотеки Qiskit [10].

Microsoft пропонує безкоштовно скористатися документацію та пакетом засобів реалізації квантових алгоритмів Quantum Development Kit (QDK) мовою квантового програмування Q#. QDK містить всі засоби, необхідні для створення власних квантових програм та експериментів на Q#. Програма «Quantum computing foundations» від Microsoft [42] позиціонується як курс для початківців. Освітнятам, зацікавленим у викладанні теорії та практики квантових обчислень, можна отримати доступ до навчальної програми, змісту програми на університетському рівні, домашніх завдань з програмування та практичних квантових проєктів [44].

D-Wave надає вільний онлайн доступ до підручників з квантових обчислень та квантового обладнання, які, за твердженням авторів [50], доступні для розуміння аудиторією як з технічною, так і нетехнічною освітою. Разом з тим зазначається, що не будуть зайвими, проте обов'язково не вимагаються, первинні (елементарні) знання з квантової фізики, лінійної алгебри, теорії комплексних чисел та основ програмування [50].

Google Quantum AI пропонує набір навчальних ресурсів, які можна інтегрувати в курси квантової інформатики:

- підручники з використання Cirq – бібліотеки програмного забезпечення Python для реалізації квантових схем та запуску їх на квантових комп'ютерах або квантових симуляторах через хмарний блокнот Colab для написання програм мовою Python;

- бібліотека дослідницьких експериментів із використанням Cirq – ReCirq;

- підручники й посібники з використання OpenFermion – це бібліотека з

відкритим кодом для компіляції та аналізу квантових алгоритмів для імітації ферміонних систем, включаючи квантову хімію;

– керівництво й навчальні посібники TensorFlow Quantum (TFQ), що є середовищем Python для квантового машинного навчання;

– серія коротких відеороликів з поясненнями Quantumcast з основних питань квантових обчислень, квантової інформації та її використання, створення квантової програми тощо [9].

QuTech – дослідницький центр квантових обчислень та квантового Інтернету – пропонує вільний безоплатний доступ на багатофункціональній платформі Quantum Technology до квантових симуляторів і комп’ютерів через власний онлайн-редактор коду, а також до теоретичних матеріалів з квантових обчислень, скороченого й розширеного посібників, прикладів кодів, тем з апаратного забезпечення, інструкцій з використання квантових вентилів (гейтів) мовою квантового програмування cQASM [51].

У світовій практиці набувають поширення онлайн-школи, майстер-класи, літні табори для підлітків з вивчення квантових технологій.

Офіс науково-технічної політики Білого дому та Національний науковий фонд визнали майбутню потребу в квантово-підготовлених працівниках та запустили інноваційну пілотну програму Національне освітнє партнерство Q-12 США (National Q-12 Education Partnership). Упродовж наступного десятиліття Національне освітнє партнерство Q-12 буде співпрацювати з американськими викладачами для забезпечення навчання квантовим технологіям, починаючи від надання інструментів у класі для практичного досвіду до розробки освітніх матеріалів і закінчуючи підтримкою учнів на шляху до професійної кар’єри у квантовій галузі, готуючи кадровий потенціал нового покоління [36]. Програма Q2Work є членом Національного освітнього партнерства Q-12 з розширення ключових освітніх компетенцій K-12 для інтеграції квантової інформатики в систему освіти. Передбачено створення веб-сайту для проведення низки семінарів з подальшого розвитку освітніх ресурсів K-12 відповідно віку для підтримки учнів і викладачів у розвитку конкурентоспроможної робочої сили в

області квантової інформатики та технологій [40].

Наприкінці 2020 року для учнів старшої школи стартував спільний проєкт The Coding School та IBM Quantum «Вступ до квантових обчислень» (Introduction to Quantum Computing). Організатори переконані, що знання у квантовій галузі мають великі перспективи для професійної діяльності в соціальних і гуманітарних науках, медицині, біології й хімії, економіці, фінансах і логістиці, промисловості та сільському господарстві, політиці й інших галузях. Усіх зареєстрованих учасників проєкту забезпечено якісним безкоштовним доступом до теоретичних відомостей та надано можливість поринути у світ квантових обчислень, незалежно від того чи планують вони в майбутньому займатися квантовими технологіями [8; 23].

Qubit by Qubit за партнерської підтримки IBM Quantum, Qiskit, Google AI регулярно організовує для учнів середньої школи та коледжів семінари, курси, літні табори з квантових обчислень, також пропонує освітянам підтримку з впровадження вивчення квантових обчислень у закладах освіти [49].

Brilliant пропонує курс «Квантові обчислення» для амбітних людей незалежно від віку. Безкоштовний доступ до матеріалів триватиме перші сім днів після реєстрації (надалі, доступ – платний). У курсі розглядаються такі теми: кубіти; квантові стани; суперпозиція; заплутаність; квантові вентиля; алгоритми NISQ; криптографія; телепортація; надщільне кодування; квантова хімія; алгоритм Гровера; алгоритм Шора [41].

Перевагами наведених ресурсів є відкритий доступ до теорії, можливість набути практичні уміння будувати та реалізовувати квантові алгоритми як самостійно, так і під керівництвом викладача [11]. Проте на даний момент суттєвим недоліком зазначених ресурсів щодо їх безпосереднього використання для навчання учнів ліцеїв вважаємо відсутність навчальних матеріалів українською мовою.

Науково-популярні ресурси про квантові технології для учнів України пропонує Х. П. Гнатенко [78; 79]. За даними електронними матеріалами (після оплати) учні мають змогу ознайомитися з фундаментальними поняттями

квантової механіки – квантова перевага, квантовий біт, квантовий паралелізм, квантове вимірювання, квантова заплутаність, квантова суперпозиція, тунелювання, квантова телепортація, а також з прикладами базових задач квантової криптографії.

Одеський Рішельєвський ліцей у рамках власного проєкту «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 [122], та «Квантова механіка» [98].

О. В. Коршунова та І. О. Завадський 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, вказуючи на їх застосування разом зі звичайними комп'ютерами [100, с. 28-29].

Н. В. Морзе зазначає, що бурхливий розвиток інформатики як науки, так і навчального предмету, потребує постійного узгодження з передовими досягненнями науки і техніки. За таких умов необхідним є узгодження навчання інформатики, математики та фізики [118, с. 5].

Ураховуючи перспективи квантового моделювання складних систем різної природи (зокрема, криптографічних, хімічних та економічних), ми вважаємо за доцільне та можливе узагальнити, систематизувати та адаптувати основи квантової інформатики для оволодіння учнями ліцеїв. Досвід світової та вітчизняної практик популяризації квантових технологій серед учнів старшого шкільного віку є переконливим свідченням можливості засвоєння основ квантових технологій за адаптованими для сприйняття відповідною аудиторією матеріалами.

У зв'язку з цим пропонується удосконалення змісту шкільної програми з інформатики шляхом вивчення основ квантової інформатики, зокрема елементів квантового програмування, що забезпечить шкільному предмету відповідний

рівень актуальності та значущості.

Аналіз досвіду навчання квантової інформатики в Україні та світі надав можливість зробити наступні висновки:

1. Систематичне навчання квантової інформатики у ЗВО відбувається лише на II та III рівнях вищої освіти. В Україні всі освітні програми з квантової інформатики започатковані у межах спеціальності 104 – Фізика та астрономія, у той час як у світі підготовка відповідних фахівців відбувається як за освітніми програмами з фізики, так і з інформатики, а також за міждисциплінарними програмами.

2. Провідні постачальники послуг квантових обчислень (IBM, Microsoft, Amazon та Google) 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 (Q#) та мовнонезалежних (Python) середовищ розробки тощо.

3. Для учнів закладів загальної середньої освіти пропонується насамперед програми неформальної освіти – окремі курси, майстер-класи, семінари, літні табори та школи, що організовуються як університетами, так і постачальниками послуг квантових обчислень та іншими стейкхолдерами.

4. У США та ЄС започатковані державні програми з підвищення кваліфікації вчителів у квантовій інформатиці та введення її основ до шкільної програми.

Ключовим фактором успіху цієї діяльності є розробка, змістове наповнення та визначення програмних результатів набуття учнями компетентностей із основ квантової інформатики.

1.3. Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Зміни в освіті не визначаються виключно на державному рівні, а мають відповідати світовим тенденціям та вимогам. Модернізація структури, змісту та організації освіти в Україні на засадах *компетентнісного підходу* розглядається як стратегічний напрям задля інтеграції вітчизняної системи освіти в

європейський та світовий освітні простори [148].

Компетентнісний підхід до організації та здійснення діяльності всіх учасників освітнього процесу – значуща складова формули Нової української школи (НУШ): «наскрізне застосування інформаційно-комунікаційних технологій в освітньому процесі ... має стати інструментом забезпечення успіху нової української школи. ... ІКТ суттєво розширяють можливості педагога, ... таким чином формуючи в учня важливі для нашого сторіччя технологічні компетентності» [125, с. 11-12]. Важливим стає не обсяг знань учня, а готовність вирішувати життєвозначущі задачі, використовуючи засвоєну навчальну інформацію. Компетентнісний підхід повинен гармонійно поєднати зміст освіти, її результати з потребами суспільства й сучасного ринку праці, інноваційними науковими тенденціями, для успішного професійного самовизначення учня та його реалізації у дорослому житті як фахівця, який зможе адекватно і швидко діяти за різних обставин, застосовувати набуті знання, брати на себе відповідальність за результати своєї діяльності, а також навчатися впродовж усього життя.

Компетентнісний підхід в освіті закріплено законодавчими нормативними документами України. Так, у Державному стандарті базової і повної загальної середньої освіти [144] *компетентнісний підхід* визначається як спрямованість освітнього процесу «на досягнення результатів, якими є ієрархічно підпорядковані ключова, загальнопредметна і предметна (галузєва) компетентності». Для учнів, які з 2018 року навчаються за програмами дванадцятирічної повної загальної середньої освіти, з 1 вересня 2022 року (для експериментальних класів з 2021) розпочне діяти Державний стандарт базової середньої освіти [141], у якому також зазначені вимоги до обов'язкових результатів навчання на основі компетентнісного підходу.

У Термінологічному словнику з основ підготовки наукових та науково-педагогічних кадрів післядипломної педагогічної освіти [169, с. 76] наводиться формалістичне тлумачення *компетентнісного підходу* як підходу до визначення результатів навчання, що базується на їх описі в термінах компетентностей.

Н. М. Бібік вказує, що *компетентнісний підхід* дозволяє у результатах задіяти суб'єктність, досвід учня, студента, що охоплює ті складові якості освіти, які лише декларувались, а насправді не виступали об'єктом контролю, у тому числі, державного. Тобто, компетентнісно зорієнтована освіта, з одного боку, логічно впливає з попереднього етапу засвоєння особистісно орієнтованого, діяльнісного базису. Водночас посилює результативний компонент, наповнює мету, зміст навчання, освітній процес, мотивацію, результати реалістичним змістом, орієнтованим на необхідну компетентність як інтегроване вираження рівня освіченості [67, с. 27].

О. І. Пометун, Н. М. Гупан і В. С. Власов тлумачать *компетентнісний підхід* як спрямованість освітнього процесу на формування і розвиток компетентностей особистості того, хто навчається. Результатом такого процесу буде формування загальної життєвої компетентності випускника, що є сукупністю ключових компетентностей, інтегрованою характеристикою особистості [137, с. 11]. Дане трактування не описує здатності, що можуть бути набуті у навчанні певного предмету (галузі).

За І. В. П'янковською *компетентнісний підхід* в освіті передбачає ефективне створення певних педагогічних умов в освітньому процесі, які забезпечують формування здатності вирішувати професійні завдання на основі отриманих знань, умінь та навичок [133, с. 204].

Розуміння компетентнісного підходу неможливе без визначення поняття компетентність (competence).

У Словнику української мови *компетентність* визначається як властивість від значення слова компетентний – який має достатні знання в якій-небудь галузі, з чим-небудь добре обізнаний, тямущий, ґрунтується на знаннях, кваліфікований [164, с. 250].

За Словником іншомовних слів *компетентність* – поінформованість, обізнаність, авторитетність [163, с. 403].

У Законі України «Про освіту» *компетентності* визначено як динамічні комбінації знань, умінь, навичок, способів мислення, поглядів, цінностей, інших

особистих якостей, що визначають здатність особи успішно соціалізуватися, провадити професійну та/або подальшу навчальну діяльність [149].

Із тлумаченням терміну «компетентність» науковцями підіймається питання його зв'язку з терміном «компетенція» (competency), шукаючи відповіді на питання чи є вони синонімічно тотожними, чи це незалежні поняття/терміни, чи існує між ними певна підпорядкованість (структурна взаємозалежність).

За Словником української мови *компетенція* – це 1) добра обізнаність із чим-небудь; 2) коло повноважень якої-небудь організації, установи або особи [164, с. 205].

Майже ідентично у Словнику іншомовних слів *компетенція* (лат. *competentia*, від *competere* – взаємно прагну, відповідаю, підходжу) – це 1) коло повноважень якої-небудь організації, установи або особи; 2) коло питань, в яких дана особа має певні повноваження, знання, досвід [163, с. 403].

У Термінологічному словнику з основ підготовки наукових та науково-педагогічних кадрів післядипломної педагогічної освіти [169, с. 76] про *компетенції* зібрано такі відомості:

– відчужена від суб'єкта, наперед задана соціальна норма (вимога) до освітньої підготовки учня, необхідна для його якісної продуктивної діяльності у певній сфері, тобто соціально закріплений результат;

– надані (наприклад нормативно-правовим актом) особі (іншому суб'єкту діяльності) повноваження, коло її (його) службових та інших прав і обов'язків;

– гарна обізнаність із чим-небудь, і коло повноважень якої-небудь організації, установи або особи;

– знання та уміння, що характеризують здатність того, хто навчається виконувати, розуміти, відображати та пізнавати те, що вимагається освітньо-кваліфікаційною характеристикою фахівця після завершення навчання;

– інтегрований результат опанування змістом загальної середньої освіти, який виражається в готовності учня використовувати засвоєні знання, уміння, навички, а також способи діяльності у конкретних життєвих ситуаціях для розв'язання практичних і теоретичних завдань.

У Рекомендаціях Європейської Комісії [6] компетенції визначаються як поєднання знань, навичок та ставлень:

- знання складаються з фактів і цифр, концепцій, ідей і теорій, що вже встановлені й підтримують розуміння певної галузі чи предмета;
- уміння визначаються як здатність і можливість діяти, використовуючи наявні знання, для досягнення результатів;
- ставлення характеризується як схильність і склад розуму, що визначають спосіб дій або реакції на ідеї оточуючих людей та ситуації.

О. І. Пометун, Н. М. Гупан і В. С. Власов освітні компетентності поділяють на три групи:

- ключові компетентності (міжпредметні), що визначаються як здатність людини здійснювати складні, поліфункціональні види діяльності, ефективно розв'язуючи проблеми;
- загально-галузеві компетентності, що формуються впродовж засвоєння змісту професійного навчання;
- предметні компетентності, що формуються впродовж вивчення певного предмету [137, с. 13].

У Державному стандарті базової і повної загальної середньої освіти [144] вказано на ієрархічну підпорядкованість компетентностей: ключова, загальнопредметна і предметна (галузєва). У Державному стандарті базової середньої освіти [141] визначені ключові компетентності та компетентності в освітніх галузях.

Важливий акцент новозмін пов'язаний із тим, що визнається рівнозначність усіх ключових компетентностей на всіх етапах навчання. Тобто, кожна освітня галузь (мовно-літературна, іншомовна, математична, природнича, технологічна, інформатична, соціальна і здоров'язбережна, фізкультурна, громадянська та історична, мистецька) володіє освітнім потенціалом, необхідним для формування кожної ключової компетентності. Цей потенціал має бути реалізований наскрізно у процесі навчання кожного предмета або курсу.

Закон України «Про Освіту» (стаття 12) [149] і Державний стандарт базової середньої освіти [141] визначають 11 ключових компетентностей: 1) вільне володіння державною мовою, 2) здатність спілкуватися рідною (у разі відмінності від державної) та іноземними мовами, 3) математична компетентність, 4) компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій, 5) інноваційність, 6) екологічна компетентність, 7) інформаційно-комунікаційна компетентність, 8) навчання впродовж життя, 9) громадянські та соціальні компетентності, пов'язані з ідеями демократії, справедливості, рівності, прав людини, добробуту та здорового способу життя, з усвідомленням рівних прав і можливостей, 10) культурна компетентність, 11) підприємливість та фінансова грамотність.

За Державним стандартом базової і повної загальної середньої освіти [144] *інформаційно-комунікаційна компетентність* належить до ключових і до предметних. Формування інформаційно-комунікаційної компетентності, зміст якої є інтегративним, відбувається в результаті застосування діяльнісного підходу під час вивчення всіх предметів навчального плану. Навчальними програмами обов'язково передбачається внесок кожного навчального предмета у формування зазначеної компетентності.

За Державним стандартом базової середньої освіти [141] *інформаційно-комунікаційна компетентність* визначається як ключова компетентність, що передбачає впевнене, критичне і відповідальне використання цифрових технологій для власного розвитку і спілкування; здатність безпечно застосовувати інформаційно-комунікаційні засоби в навчанні та інших життєвих ситуаціях, дотримуючись принципів академічної доброчесності.

За Рекомендаціями Європейської Комісії *цифрова компетентність* (digital competence) передбачає впевнене, критичне і відповідальне використання цифрових технологій і взаємодію з ними для навчання, роботи й участі в житті суспільства. Вона включає в себе грамотність в області інформації та даних, комунікацію і співпрацю, медіаграмотність, створення цифрового контенту (включаючи програмування), безпеку (включаючи цифрове благополуччя і

компетентності, пов'язані з кібербезпекою), питання, пов'язані з інтелектуальною власністю, рішення проблем і критичне мислення [6, с. 9].

Концепція розвитку цифрових компетентностей [151] вказує на важливість формування навичок у сфері інформаційно-комунікаційних та цифрових технологій, тобто набуття *цифрової компетентності* – динамічної комбінації знань, умінь, навичок, способів мислення, поглядів, інших особистих якостей у сфері інформаційно-комунікаційних та цифрових технологій, що визначає здатність особи успішно соціалізуватися, провадити професійну та/або подальшу навчальну діяльність із використанням таких технологій.

У Державному стандарті базової середньої освіти питання квантових технологій не розглядаються через те, що їх елементи (зокрема, початки квантової фізики) опановуються на третьому рівні повної загальної середньої освіти – у профільній середній освіті, що передбачає виконання учнем вимог до результатів навчання, які мали бути визначені Державним стандартом профільної середньої освіти, затвердження якого заплановане на 2023 рік. Це зумовлює необхідність уточнення змісту інформаційно-комунікаційної компетентності учнів ліцеїв шляхом уведення до неї компетентностей з основ квантової інформатики.

Міжнародна неполітична асоціація WorldSkills International об'єднує 85 країн. Своєю місією вона називає підвищення репутації та визнання кваліфікованих особистостей. WorldSkills International вважає необхідністю показати наскільки важливі уміння (навички) для досягнення економічного зростання та особистого успіху, тому організовує професійні змагання різного рівня для молодих людей у віці до 22 років по всьому світу.

На заході WorldSkills Kazan 2019, були представлені навички, попит на які зростає з кожним роком. Уперше до переліку навичок, за якими очікуються величезні зміни, були внесені навички з використання квантових технологій, які WorldSkills визначає як ключові уміння 2030-х років (рис. 1.1, 1.2).

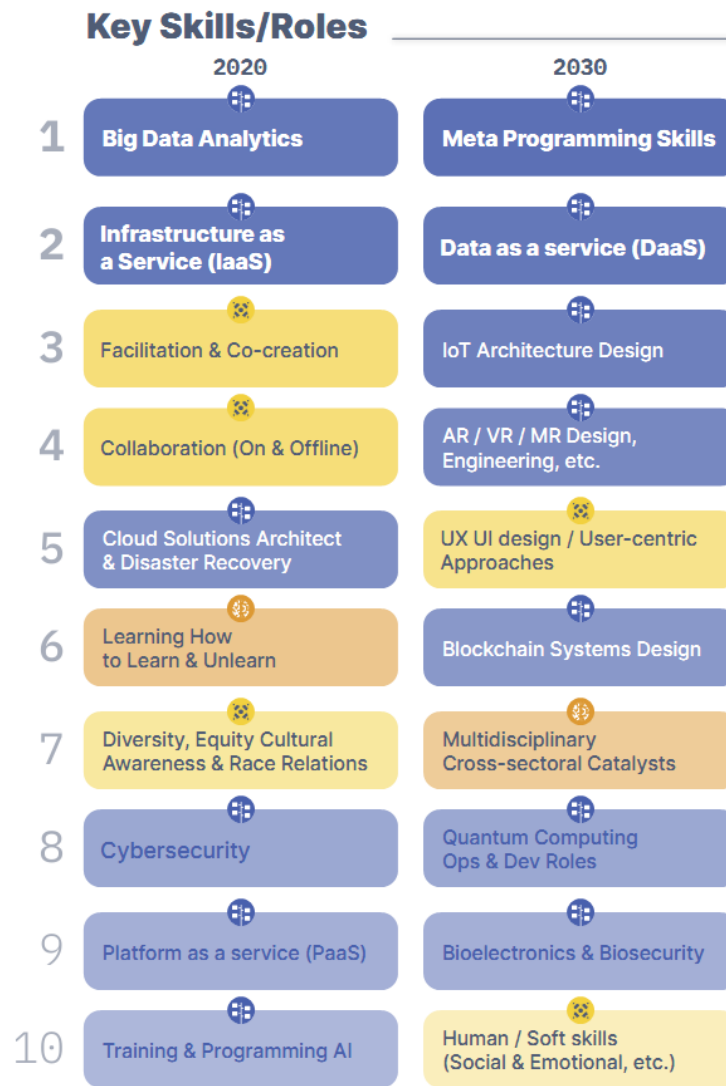


Рис. 1.1. Ключові уміння та ролі 2020-х та 2030-х років за WorldSkills [13, с. 120]

Змагання із володіння компетентностями у квантових технологіях проходили за категорією «Компетентності майбутнього». Основну увагу було приділено компетентностям у квантових комунікаціях (рис. 1.3). У технічному описі компетентності, вказано, що, зокрема, «завдяки квантовому комп'ютеру можна дібрати ключ до більшості сучасних алгоритмів шифрування у кілька разів швидше й ефективніше, ніж це можливо сьогодні. Таким чином, дані, зашифровані найбільш популярними криптографічними алгоритмами з відкритим ключем, заснованими на складності факторизації великих чисел, можуть бути розшифровані за поліноміальний час (в реальному часі), у той час як для традиційних комп'ютерів час виконання характеризується

експоненціальним зростанням. Завдання захисту інформації від кібератак за допомогою квантового комп'ютера також включає в себе технології управління квантовими мікрочастинками. Ця технологія називається «квантовий зв'язок» і гарантує абсолютну безпеку передавання даних на рівні фундаментальних законів фізики» [14, с. 4].

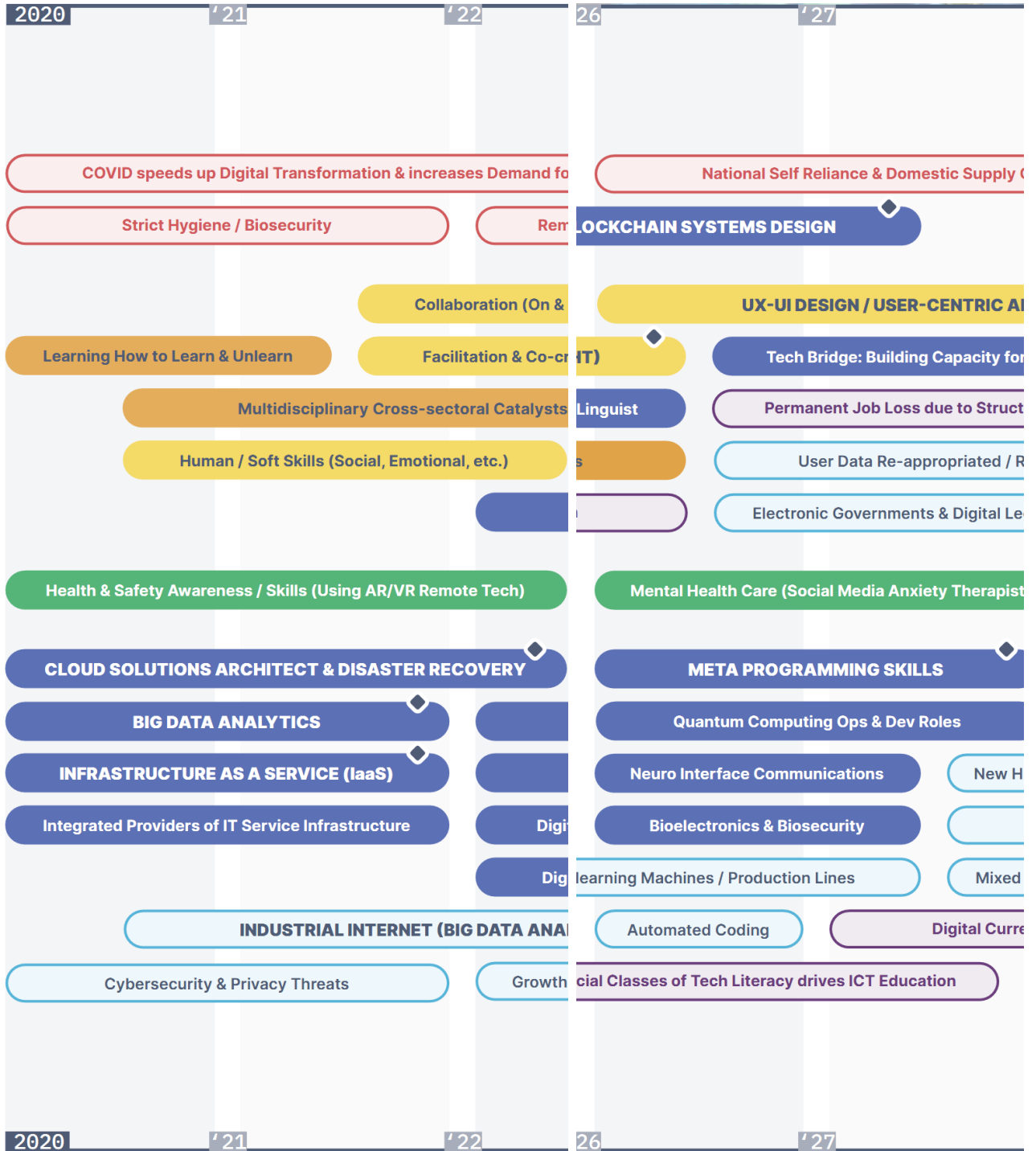


Рис. 1.2. Прогноз часу масової затребуваності навичок із квантових технологій за WorldSkills [13, с. 121]

На змаганнях WorldSkills знання та розуміння перевіряються через оцінювання результатів практичної роботи – окремі тести на знання та розуміння не передбачені. У табл. 1.1 наведені критерії оцінювання компетентностей у квантових комунікаціях для учасників змагань, насамперед – учнів професійних ліцеїв.



Рис. 1.3. Презентація компетентностей у квантових технологіях на WorldSkills Kazan 2019 [47]

Таблиця 1.1

**Компетентності у квантових комунікаціях
учнів професійних ліцеїв [14, с. 7-10]**

№	Компетентність		%
	Фахівець повинен знати та розуміти	Фахівець повинен вміти	
1	<i>Організація та управління роботою</i>		5
	<ul style="list-style-type: none"> – принципи й методи безпечної роботи у цілому та стосовно квантових технологій; – призначення, використання, методи догляду та технічного обслуговування обладнання та матеріалів, а також їх вплив на безпеку робочого місця; – принципи охорони навколишнього середовища та безпеки, а також застосування цих принципів при роботі; – принципи й методи організації, контролю та 	<ul style="list-style-type: none"> – готувати і підтримувати робоче місце в безпечному, охайному й функціональному стані; – бути готовим до виконання поставлених завдань, включаючи повне дотримання техніки безпеки та охорони здоров'я; – планувати роботу так, щоб максимізувати продуктивність і мінімізувати порушення графіка; 	

№	Компетентність		%
	Фахівець повинен знати та розуміти	Фахівець повинен вміти	
	<p>управління роботою;</p> <ul style="list-style-type: none"> – принципи комунікації та співробітництва; – обсяг і межі своєї ролі та ролі інших, індивідуальних і колективних обов'язків та відповідальності; – параметри, у рамках яких необхідно планувати заходи; – принципи і методи управління часом. 	<ul style="list-style-type: none"> – обирати й безпечно використовувати все обладнання та матеріали відповідно до інструкцій виробника; – дотримуватись вимог стандартів здоров'я та безпеки щодо навколишнього середовища, обладнання та матеріалів; – відновлювати робочу зону до належного стану; – підтримувати зворотний зв'язок і надавати підтримку. 	
2	<i>Робота з вимірвальним обладнанням</i>		25
	<ul style="list-style-type: none"> – принцип роботи оптичного рефлектометра; – правильну конфігурацію оптичного рефлектометра; – основні фактори, що призводять до затухання сигналу у волоконно-оптичній лінії зв'язку; – принципи роботи лічильника електроенергії; – правильний вибір типу електричних роз'єднань з'єднань. 	<ul style="list-style-type: none"> – проводити компетентний візуальний огляд компонентів волоконно-оптичної лінії зв'язку; – вимірювати затухання сигналу із відстанню; – виконувати вимірювання якості лінії; – оцінювати точність результатів вимірювань; – вимірювати потужність лазерного випромінювання; – керувати приймачами-передавачами квантового ключа. 	
3	<i>Використання квантових технологій</i>		20
	<ul style="list-style-type: none"> – фізичні основи процесів, що використовуються в квантових технологіях шифрування; – закони фізики і оптики; – принцип роботи елементів, що використовуються в оптичних схемах приймачів-передавачів квантового ключа; – принцип роботи автокомпенсаційного двопроточного контуру квантового розподілу. 	<ul style="list-style-type: none"> – реалізовувати квантовий протокол розподілу ключів BB84; – знаходити причини використання кумулятивної лінії; – проводити перевірку коефіцієнту помилки квантового біту – QBER (quantum bit error rate) – для підтвердження присутності злоумисника («Сви»); – застосовувати математичні методи при вирішенні практичних завдань. 	
4	<i>Зварювання оптичного волокна</i>		15
	<ul style="list-style-type: none"> – вимоги правил з охорони праці й техніки безпеки, пов'язані з оптоволоконними лініями; – фізичні принципи, що ґрунтуються на роботі волоконно-оптичної лінії зв'язку; – вимоги до підготовки «пігтейлів» та інших волоконно-оптичних компонентів для практичної роботи з ними; – принцип роботи апарата для зварювання волоконно-оптичної лінії зв'язку. 	<ul style="list-style-type: none"> – зварювати оптичні волокна; – вимірювати затухання у волоконно-оптичній лінії; – скласти технічно грамотний звіт про виконану роботу. 	
5	<i>Усунення неполадок і планове технічне обслуговування</i>		5
	<ul style="list-style-type: none"> – етапи визначення характеру пошкодження; – вплив пошкоджень на функціонування пасивних волоконно-оптичних елементів; 	<ul style="list-style-type: none"> – визначати характер пошкодження, знаходити й максимально якісно та швидко усувати пошкодження; 	

№	Компетентність		%
	Фахівець повинен знати та розуміти	Фахівець повинен вміти	
	– можливі наслідки для бізнес-процесів у результаті мережевих проблем.	– заповнювати звіти про пошкодження; – встановлювати оновлення для забезпечення відповідності системи вимогам безпеки; – надавати експертні консультації та підтримувати систему.	
6	<i>Початкове налаштування квантового шифрування</i>		15
	– процедуру перевірки ключів; – причину використання двох базисів для підготовки/вимірювання фотонів; – принципи аналізу та обробки графічних даних.	– знаходити значення, необхідні для початку налаштування; – працювати з підпрограмами конфігурації; – правильно оцінювати швидкість генерації квантових ключів.	
7	<i>Документування аналітичних рішень</i>		5
	– важливість детального документування розроблених рішень.	– виявляти професійну компетентність у підготовці документації; – розробляти документацію користувача; – працювати з технічною документацією англійською мовою.	
8	<i>Робота з приймачами-передавачами з використанням квантового каналу</i>		5
	– принцип роботи приймачів-передавачів, що використовують квантовий канал; – принцип роботи лазерного інтерферометра; – принцип роботи однофотонних детекторів та причини появи темного відліку; – принцип роботи синхронного детектора.	– працювати з програмним забезпеченням модулів QRATE; – визначати причину збільшення помилки квантового біту передачі даних.	
9	<i>Розв'язання проблем, інновації, творчість</i>		5
	– загальні типи проблем, які можуть виникнути під час розробки рішень з аналізу даних; – поширені типи проблем, які можуть виникнути в комерційній організації; – діагностичні підходи до вирішення проблем; – тенденції та зміни в галузі, включаючи нові технології, методи, мови, умовні позначення та технічні навички.	Використовувати аналітичні навички для: – аналізу та синтезу складної або неоднорідної інформації; – визначення тривіальної та нетривіальної залежності даних. Використовувати дослідницькі та навчальні навички для: – самостійного дослідження проблем, що виникають; – самостійного вирішення проблем, що виникають в процесі експлуатації; – своєчасного виявлення та вирішувати проблем; – правильного збору та аналізу інформації; – розробки альтернатив для прийняття рішень, вибору найкращих варіантів й реалізації необхідних рішень.	
Разом			100

Рівень сформованості компетентностей у квантових комунікаціях учасників змагань WorldSkills Kazan 2019 визначався шляхом оцінювання тестового проєкту, в рамках якого учасники змагань повинні виконати завдання того ж рівня складності, з якими стикається робочий персонал компанії, що працює з квантовими пристроями в реальному житті. Основними напрямками роботи фахівців у галузі квантових технологій є технічне обслуговування й організація роботи квантових пристроїв зв'язку, систем квантових датчиків і квантових комп'ютерів. Основними робочими завданнями для таких фахівців є усунення несправностей, налаштування, калібрування і т. ін. вищезазначених квантових систем. Також до сфери діяльності цих фахівців входить розробка алгоритмів роботи таких пристроїв, як квантові комп'ютери та квантові пристрої зв'язку. Фахівець повинен вміти добирати відповідні параметри роботи квантових систем для підтримки нормального режиму їх роботи, для чого він має виконувати широкий спектр різних завдань – керувати опрацюванням й виявленням квантових станів окремих атомів, фотонів і т. ін.; розраховувати ймовірнісні моделі поведінки окремих квантових елементів та ансамблів квантових елементів; опрацьовувати пасивні та активні волоконно-оптичні елементи; опрацьовувати статистичні дані; опрацьовувати та аналізувати експериментально отримані дані; працювати з вимірювальним обладнанням [14, с. 16].

Тестовий проєкт може мати модульну структуру, спрямовану на повне налаштування та запуск системи квантового зв'язку. Це завдання передбачає виконання повного комплексу завдань із формування стійкого розподілу квантового ключа із використанням пристроїв передавання («Аліса») і пристроїв прийому («Боб») квантових станів одиночних фотонів. При повсякденному використанні квантових пристроїв зв'язку, ключем є розподілена бітова послідовність – вона використовується для кодування класичної інформації (голосового повідомлення, відеоповідомлення, електронного письмового повідомлення) за допомогою криптографічних методів. Тому фахівець із квантових технологій, виконуючи запропоноване завдання, повинен забезпечити

безперервне формування секретного криптографічного ключа [14, с. 17].

Остаточним результатом цього завдання є бітова послідовність із прийнятним рівнем помилок (секретний криптографічний ключ), що безперервно розподіляється між приймачем і передавачем, використовуючи квантові стани одиночних фотонів. Біти інформації кодуються у квантовий стан одиночних фотонів за допомогою передавального пристрою «Аліса» й виявляються за допомогою приймального пристрою «Боб». У цьому сценарії, щоб належним чином розпочати роботу системи даних пристрою, необхідно сформуванати квантовий волоконно-оптичний канал і повністю визначити його параметри, критичні для розподілу квантових ключів.

Тестовий проєкт складається з 5 модулів (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Тестовий проєкт для оцінювання рівня сформованості компетентностей із квантових комунікацій учнів професійних ліцеїв [15, с. 4-7]

№	Модуль
1	<p>Модуль А. Монтаж волоконно-оптичного квантового каналу зв'язку (2 години) <i>Мета:</i> створити волоконно-оптичний квантовий канал зв'язку, придатний для розподілу квантових ключів. <i>Опис отриманого продукту:</i> волоконно-оптичний квантовий канал довжиною близько 30 км з оптичними роз'ємами на кінцях. <i>Використовуване обладнання:</i> апарат для зварювання оптичних волокон, сколювач оптичного волокна, стріпер, оптичний рефлектометр, термоусадочні гільзи, спирт, серветки, мікроскоп, персональний комп'ютер, джерело оптичного випромінювання на комунікаційній довжині хвилі, вимірник потужності. <i>Засоби індивідуального захисту:</i> захисні окуляри, латексні рукавички (дозволяється знімати при занесенні результатів у звіт і при роботі з комп'ютером).</p> <p><u>Підмодуль А.1 Зварювання оптичного квантового каналу зв'язку довжиною близько 30 км</u> 1. Підготуйте до зварювання необхідну кількість оптичних пігтейлів і котушок оптичного волокна. 2. Виконайте зварювання підготовлених елементів. 3. Після зварювання оптичного волокна сфотографуйте екран зварювального апарату в режимі Hot Image. 4. Виконайте оптичну ізоляцію квантового каналу.</p> <p><u>Підмодуль А.2 Визначення основних параметрів квантового каналу зв'язку</u> 1. Виміряйте оптичним рефлектометром отриманий квантовий канал (необхідно забезпечити максимальну точність вимірювання). 2. Проведіть рефлектометрію квантового каналу (усі дані повинні зберігатися у форматі, придатному для комп'ютерної обробки). 3. Перевірте цілісність квантового каналу і проведіть ідентифікацію всіх потенційних і спостережуваних неоднорідностей. 4. Визначте загальні параметри квантового каналу, а також кожного сегмента і елементів квантового каналу окремо.</p>

№	Модуль
	<p>5. Налаштуйте оптичну схему для вимірювання загальних оптичних втрат і рівня зворотних відображень в квантовому каналі. Виконайте вимірювання.</p> <p><u>Підмодуль А.3 Складання звіту</u></p> <p>1. Створіть документ Microsoft Office (або подібний) для заповнення звіту, назва повинна містити ім'я та дату.</p> <p>2. Унесіть усі виміряні значення та збережені дані підмодулів А.1 та А.2. Укажіть усі важливі параметри квантового каналу у звіті (втрати на зварних з'єднаннях, довжина з'єднаних сегментів, загальна довжина лінії, загальне ослаблення в лінії). Значення, зазначені у звіті, повинні відповідати точності вимірювання з урахуванням похибки. Звіт повинен надавати можливість провести точну оцінку та характеристику правильності вимірювання кожної величини.</p>
2	<p>Модуль В. Організація роботи оптичної частини квантового приймача пристрої (5 годин)</p> <p><i>Мета:</i> зібрати на оптичній платформі двопрхідну автокомпенсаційну Plug&Play оптичну схему.</p> <p><i>Опис отриманого продукту:</i> пристрій приймача «Боб» і передавача «Аліса», що містять оптичні схеми, придатні для здійснення декодування і кодування інформаційних бітів в квантові стани одиночних фотонів.</p> <p><i>Використовуване обладнання:</i> оптичний атенюатор для перебудовування, лазер, фазовий модулятор, набір пасивних волоконно-оптичних елементів.</p> <p><u>Підмодуль В.1. Робота з оптичними схемами квантових приймально-передавальних пристроїв</u></p> <p>1. Зберіть із наявних компонентів оптичні схеми «Боба» та «Аліси» на роз'ємних з'єднаннях (при розміщенні елементів схеми передбачити можливість підключення квантового каналу, лазера, детекторів одиночних фотонів, синхронного детектора і фазових модуляторів, а також можливість монтування схеми в блоки генерації квантового ключа).</p> <p><u>Підмодуль В.2. Визначення параметрів оптичних схем приймально-передавальних пристроїв</u></p> <p>1. Під'єднайте джерело лазерного випромінювання до зібраної схеми «Боба».</p> <p>2. Виберіть частини оптичної схеми, на яких повинні бути виконані вимірювання потужності, щоб оцінити рівень затухання, необхідний для певного загасання оптичних імпульсів. Виконайте вимірювання.</p> <p>3. Виміряйте величину оптичних втрат в оптичній схемі «Аліса» і в оптичній схемі «Боб».</p> <p><u>Підмодуль В.3. Розрахунок параметрів запуску приймально-передавальних пристроїв</u></p> <p>Обчисліть такі параметри:</p> <p>1. Число імпульсів в трейні. Задано: частота проходження лазерних імпульсів і довжина накопичувальної лінії.</p> <p>2. Період трейна. Задано: довжина квантового каналу і довжина накопичувальної лінії.</p> <p>3. Вікно очікування приходу відображення в тактах. Задано: частота проходження лазерних імпульсів, довжина квантового каналу, довжина накопичувальної лінії.</p> <p>4. Необхідний рівень середньої оптичної потужності для досягнення 0,3 фотона на імпульс на виході оптичної схеми «Аліса».</p> <p>5. Значення загасання на змінному оптичному атенюаторі для досягнення 0,3 фотона на імпульс на виході оптичної схеми «Аліса».</p>
3	<p>Модуль С. Калібрування квантово-оптичної лінії і передавання квантового ключа (5 годин)</p> <p><i>Мета:</i> Запуск системи розподілу квантових ключів, яка дозволяє обмінюватися секретною інформацією по відкритому каналу, а також первинна обробка квантових ключів.</p> <p><i>Опис отриманого продукту:</i> бітова послідовність з допустимим рівнем помилок (секретний криптографічний ключ), що розподіляється безперервно між пристроями</p>

№	Модуль
	<p>приймача і передавача за допомогою квантових станів одиночних фотонів. <i>Використовуване обладнання:</i> приймально-передавальні пристрої квантових ключів, виготовлений в модулі А квантовий канал (замінити котушку на нову при невиконанні учасником зварювальних операцій), виготовлена в модулі В оптична схема (замінити на робочу схему, якщо виконана учасником є неякісною), секундомір, персональний комп'ютер з встановленим програмним забезпеченням.</p> <p><u>Підмодуль С.1. Підключення приймально-передавальних пристроїв з використанням квантового каналу</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Підключіть пристрої «Аліса» і «Боб» до квантового каналу, використовуючи зварену волоконно-оптичну лінію. 2. Запустіть програмний термінал на блоці управління пристроєм «Аліса». 3. Запустіть програмний термінал на блоці управління пристроєм «Боб». 4. Налаштуйте період очікування імпульсів на детекторах «Боба». 5. Визначити час (номер такту) повернення імпульсу, відбитого від дзеркала Фарадея. 6. Підтвердити, що рефлекс, за яким обиралось вікно, правильний. <p><u>Підмодуль С.2. Налаштування параметрів роботи квантових пристроїв зв'язку</u></p> <p>Уведіть відповідні параметри в програму.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Знайти напругу півхвильового зміщення на фазовому модуляторі пристрою «Боб», що відповідає зміщенню фази на π. 2. Знайдіть час затримки активації фазової модуляції на пристрої «Аліса». <ol style="list-style-type: none"> (a) Попередньо оцініть час затримкування. (b) За допомогою сканування визначте послідовність імпульсів. (c) Експериментально визначте час затримки. 3. Знайти напругу півхвильового зміщення на фазовому модуляторі пристрою «Аліса», що відповідає зміщенню фази на π. 4. Визначити оптимальне положення вікна роботи волокна з дисперсним зміщенням (DSF). У розробленому програмному забезпеченні для кожного детектора індивідуально налаштовується тимчасове положення вікна спрацьовування. <p><u>Підмодуль С.3. Генерація квантового ключа</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Запустити процес генерації квантового ключа, використовуючи отримані значення параметрів за допомогою програм «Alice.vi» і «Bob.vi». <ol style="list-style-type: none"> (a) Увести значення у всі необхідні поля. (b) Запустити генерацію ключа. 2. Виконати ручне налаштування критичних параметрів для досягнення максимальної довжини ключа і мінімального коефіцієнту помилки квантового біту (QBER). <p><u>Підмодуль С.4. Дослідження характеристик однофотонного детектору</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Визначте час простою детектора. 2. Визначте квантову ефективність. 3. Визначте ймовірність виникнення постімпульса. 4. Обчисліть інтенсивність насичення детектора.
4	<p>Модуль Д. Розрахунки з використанням квантового комп'ютера (5 годин)</p> <p><i>Мета:</i> реалізація алгоритмів пошуку в несортованій базі даних на основі алгоритму квантового пошуку. Реалізація квантових програм і запуск виконуються на реальних квантових процесорах ІВМ.</p> <p><i>Опис отриманого продукту:</i> реалізація програми пошуку в несортованій базі даних та інших програм на платформі квантового комп'ютера.</p> <p><i>Використовуване обладнання:</i> персональний комп'ютер з встановленим програмним забезпеченням і доступом в Інтернет (конкурсанти повинні реалізувати запропоновані алгоритми на платформі IBM Q Experience).</p>
5	<p>Модуль Е. Презентація результатів налаштування (1 година)</p> <p><i>Мета:</i> представити результати налаштування системи квантового розподілу ключа.</p>

№	Модуль
	<i>Опис отриманого продукту:</i> створення звіту про налаштування і зборку системи квантового розподілу ключів.

Попри те, що заявлена категорія змагань «Квантові технології», тестовий проєкт 2019 року був спрямований насамперед на реалізацію квантових комунікацій та виконання квантових обчислень, тому система компетентностей (табл. 1.1) та засоби їх діагностики (табл. 1.2) є неповними.

На семінарі «Key Concepts for Future Quantum Information Science Learners» (Основні концепції для учнів, що в майбутньому вивчатимуть квантову інформатику) [27] було вказано, що квантова інформатика використовує квантові принципи для перетворення інформації – отримання, кодування, маніпулювання та застосування, і сформульовані 9 ключових концепцій (понять), що можуть бути покладені в основу розробки більш повної системи компетентностей у квантових технологіях:

1) *квантова інформатика* – охоплює квантові обчислення, квантовий зв'язок та квантові датчики, а також стимулює інші досягнення науки і технології;

2) *квантовий стан* – це математичний опис такої фізичної системи, як атом, для забезпечення обробки квантової інформації;

3) квантові програми призначені для ретельного маніпулювання крихкими (нестійкими) квантовими системами без спостереження для збільшення ймовірності того, що остаточне *вимірювання* забезпечить передбачуваний результат;

4) *квантовий біт, або кубіт*, є фундаментальною одиницею квантової інформації і кодується в фізичній системі як поляризаційні стани світла, енергетичні стани атома або спінові стани електрона;

5) *сплутаність*, нерозривний зв'язок між кількома кубітами, є ключовою властивістю квантової системи, необхідною для отримання квантової переваги у більшості квантових програм;

б) для успішного завершення квантових програм крихкі квантові стани

повинні зберігатися або підтримувати *когерентність*;

7) *квантові комп'ютери*, що використовують кубіти та квантові операції, розв'язують певний комплекс обчислювальних задач ефективніше, ніж класичні комп'ютери;

8) *квантові комунікації* використовують сплутування або канал передачі, такий як оптичне волокно, для передавання квантової інформації між різними місцями;

9) *квантові датчики (сенсори)* використовують квантові стани для виявлення та вимірювання фізичних властивостей з найвищою точністю завдяки квантовій механіці.

У Європейському Союзі розробляється рамка компетентностей у галузі квантових технологій (Competence Framework for Quantum Technologies, Додаток А) [17], що у майбутньому стане розширенням рамки цифрових компетентностей DigComp та стане відправною точкою для планування і структурування різноманітних освітніх та навчальних проєктів з квантових технологій. На рис. 1.4 подано загальну структуру поточної версії (1.0, травень 2021 року) рамки компетентностей у галузі квантових технологій.

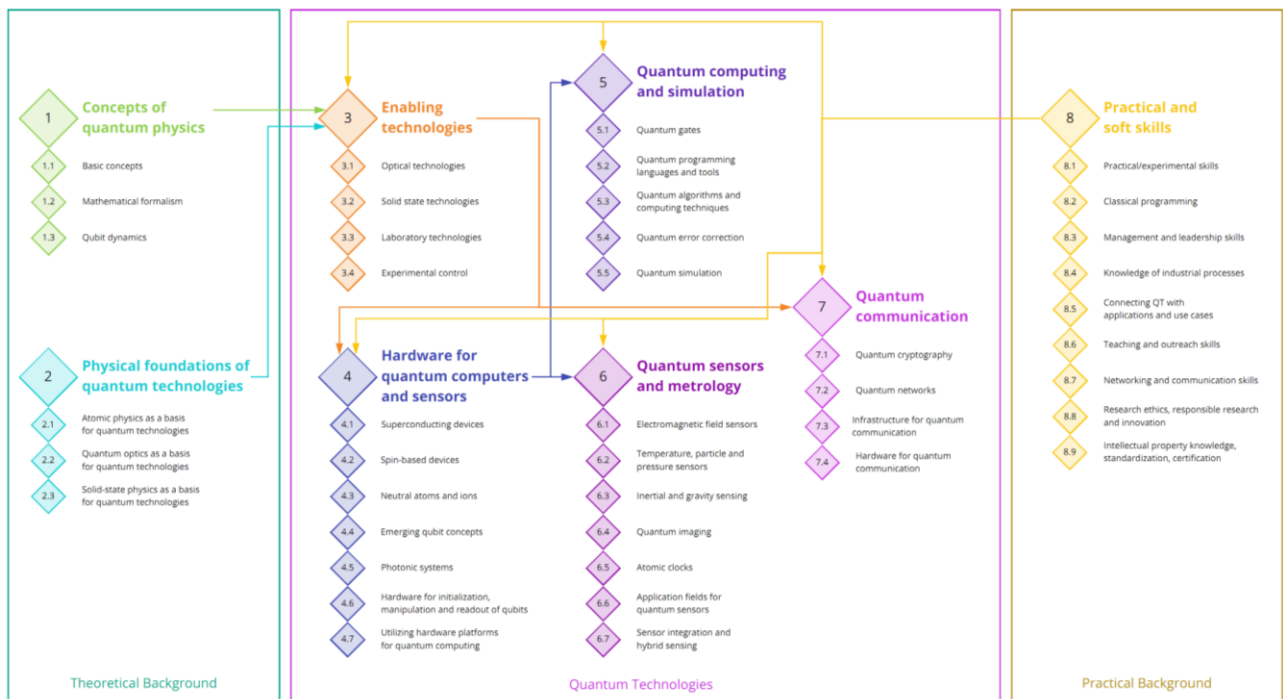


Рис. 1.4. Загальна структура рамки компетентностей у галузі квантових технологій (Competence Framework for Quantum Technologies) [17]

Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв визначимо 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. Вони включають в себе частинні компетентності, що охоплюють такі питання (рис. 1.5): 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 (неквантового) програмування, застосування квантових технологій, загальні навички/компетенції).

Структуру та зміст компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв подано у Додатку А, табл. 1.3 та рис. 1.5.

Таблиця 1.3

Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

№	Компетентності	
	учень повинен знати та розуміти	учень повинен вміти
1	Фізичні основи квантових технологій	
	– основні поняття квантової фізики (оптики, механіки): суперпозиція, інтерференція; квантування енергії, пов'язані (заплутані) стани, тунелювання; статистична природа квантової фізики; принцип	– визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах; – математично описувати стани та базиси Белла;

№	Компетентності	
	учень повинен знати та розуміти	учень повинен вміти
	<p>невизначеності Гейзенберга; прості приклади декогеренції (релаксація, дефазування, втрата фотонів); нерівності Белла, стани Белла, квантова телепортація, надщільне кодування; фотонні взаємодії атомів і матерії; поляризаційні ступені свободи (сфера Пуанкаре);</p> <p>– <i>динаміка кубітів</i>: поняття кубіту, сфера Блоха, маніпулювання кубітами за допомогою імпульсів, математичний опис обертання кубітів.</p>	<p>– математично описувати надщільне кодування;</p> <p>– математично описувати квантову телепортацію;</p> <p>– подавати кубіт на сфері Блоха;</p> <p>– застосовувати засоби перетворення квантових алгоритмів на керуючі імпульси для квантових комп'ютерів.</p>
2	Математичні основи квантової інформатики	
	<p>– <i>основи теорії комплексних чисел</i>: поняття комплексного числа, форми запису комплексних чисел, подання/відображення комплексного числа у комплексній площині;</p> <p>– <i>основи лінійної алгебри</i>: задання векторів на площині та у просторі, операції над векторами; матриці, квадратні матриці, операції над матрицями, унітарні матриці;</p> <p>– <i>математика основ квантової фізики</i>: бра-кет нотація, хвильова функція, когерентні стани, стани одиночних фотонів;</p> <p>– <i>статистична природа квантових вимірювань</i>.</p>	<p>– пояснювати поняття уявної одиниці та комплексного числа, зображати комплексні числа у комплексній площині, здійснювати перехід від алгебраїчної форми подання до тригонометричної;</p> <p>– подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації;</p> <p>– оперувати із стандартними базисами;</p> <p>– подавати вектор у обраному базисі;</p> <p>– перетворювати базис подавати вектор у обраному базисі векторного простору;</p> <p>– наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними.</p>
3	Забезпечувальні технології	
	<p>– <i>оптичні технології</i>: класична оптика, лазери, оптоелектронні та оптомеханічні системи, джерела одиночних фотонів, джерела заплутаних фотонів, детектори на одиночних фотонах;</p> <p>– <i>лабораторні технології</i>: аналіз шуму, технології чистих приміщень;</p> <p>– <i>експериментальне управління</i>: програмне забезпечення, апаратне забезпечення, квантові алгоритми керування.</p>	<p>– розрізняти джерела фотонів;</p> <p>– описувати типову структуру джерел одиночних та заплутаних фотонів.</p>
4	Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків	
	<p>– пристрої на основі спіна: напівпровідникові квантові точки;</p> <p>– нейтральні атоми та іони: іонні пастки;</p> <p>– нові види кубітів: молекулярно-спінові кубіти;</p> <p>– обладнання для ініціалізації, маніпуляції та зчитування кубітів: мікрохвилі, лазери, резонатори (наприклад, зчитування та затвори надпровідних кубітів), вимикачі, фазоперемикачі, затримувачі;</p> <p>– використання апаратних платформ для квантових обчислень: порівняльний аналіз, інтеграція з класичним обладнанням.</p>	<p>– описувати типові структури квантових комп'ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи;</p> <p>– виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів;</p> <p>– виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах.</p>
5	Квантові обчислення та моделювання	
	– квантові вентиля: однокубітні вентиля, двокубітні	– записувати квантові вентиля за

№	Компетентності	
	учень повинен знати та розуміти	учень повинен вміти
	<p>та багатокубітні вентиля;</p> <ul style="list-style-type: none"> – квантові мови, засоби та платформи програмування: графічні платформи, середовище розробки програмного забезпечення, мови квантового програмування; – базові квантові алгоритми: алгоритм Шора, алгоритм Гровера, алгоритми квантової оптимізації, оцінка квантової фази, алгоритми квантової лінійної алгебри, квантові блукання, інші алгоритми; – квантова корекція помилок: фізичні механізми декогерентності, код виправлення квантових похибок; – елементи квантового моделювання: цифрові квантові симулятори. 	<p>допомогою унітарних матриць;</p> <ul style="list-style-type: none"> – розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви); – виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентиля Тоффолі та Фредкіна); – застосовувати квантові вентиля для запису квантових алгоритмів; – послуговуватись мовами та засобами квантового програмування; – реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.); – використовувати бібліотеки квантових алгоритмів оптимізації, машинного навчання, квантового блукання, квантового перетворення Фур'є та ін.; – застосовувати засоби квантової корекції помилок; – працювати із квантовими симуляторами.
6	Квантові датчики та метрологія	
	<ul style="list-style-type: none"> – атомні годинники; – галузі застосування квантових датчиків: метрологія на одноквантовому рівні; медицина та молекулярна біологія; природні ресурси, цивільне будівництво та моніторинг Землі; транспорт і навігація; управління промисловими процесами. 	<ul style="list-style-type: none"> – описувати переваги та обмеження використання квантових датчиків (сенсорів) порівняно з іншими типами датчиків; – пояснювати особливості будови атомних годинників; – наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях.
7	Квантова комунікація	
	<ul style="list-style-type: none"> – квантова криптографія: квантовий розподіл ключа, безпечна автентифікація, цифрові підписи, безпечне сховище; галузі застосування; – квантові мережі: квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі; – інфраструктура 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. 	<ul style="list-style-type: none"> – демонструвати роботу протоколів BB84, E91; – описувати корекцію помилок із квантовим кульбітом; – послуговуватись квантовими генераторами випадкових чисел; – описувати принципи роботи та будову обладнання квантових мереж; – наводити приклади застосування квантової криптографії у різних галузях.
8	Практичні навички та загальні компетенції	
	<ul style="list-style-type: none"> – основи класичного (неквантового) програмування: мови програмування, алгоритми, класи складності, криптографія; – застосування квантових технологій; 	<ul style="list-style-type: none"> – реалізовувати базові класичні алгоритми (зокрема криптографічні) мовами програмування; – наводити приклади використання

№	Компетентності	
	учень повинен знати та розуміти	учень повинен вміти
	– загальні навички/компетенції: навички управління та лідерства (огляд, потенціал та обмеження, економічний вплив квантових технологій, підприємництво, розробка та реалізація проєкту); комунікація з експертами в галузі; дослідницька етика та відповідальність, інноваційність; знання про інтелектуальну власність, стандартизацію, сертифікацію.	квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги; – демонструвати навички управління та лідерства, мережевої взаємодії та спілкування з експертами.



Рис. 1.5. Загальна структура компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Таким чином, у результаті проведеного аналізу була визначена загальна структура та зміст компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Проведений аналіз надав можливість зробити наступні висновки:

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

2. Ураховуючи, що квантові інформаційні технології є міждисциплінарною галуззю знань, відповідні компетентності не можуть бути визначені як частина цифрових компетентностей. Опрацювання попередніх результатів світових та європейських проєктів з відбору та визначення компетентностей у квантових технологіях надало 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.

3. 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).

4. Для кожної групи компетентностей визначено їх зміст у термінах знань, розуміння, навичок та ставлень учнів.

Висновки до розділу 1

Здійснивши аналіз джерел з проблеми навчання квантовим технологіям та квантової інформатики було з'ясовано, що: квантові інформаційні технології у країнах-лідерах технологічного та соціально-економічного розвитку визнаються стратегічно важливим міждисциплінарним напрямом, попит на фахівців з якого стрімко зростатиме; Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій, започаткована 2021 року, передбачає навчання квантової інформатики на всіх рівнях освіти, розпочинаючи з початкової школи, що на сьогодні реалізується насамперед за рахунок програм неформальної освіти (окремі курси, майстер-класи, семінари, літні табори та школи); ключові компоненти методичної системи навчання інформатики (а саме цілі, зміст та засоби навчання) потребують уточнення для забезпечення можливості систематизовано навчати основ квантової інформатики учнів ліцеїв, поєднуючи концептуальне та інтуїтивне розуміння концепцій квантової фізики та фізичних основ квантових технологій із методично адаптованими науковими засадами квантових обчислень та моделювання.

Ґрунтуючись на фундаментальних ідеях компетентнісного підходу у навчанні, а також взявши за основу структуру та зміст Європейської рамки компетентностей для квантових технологій, визначено ключове поняття дослідження – 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; частинними компетентностями (групами

компетентностей) системи 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.

Основні результати, отримані у розділі 1, опубліковані у [29; 108].

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ НАВЧАННЯ

ОСНОВ КВАНТОВОЇ ІНФОРМАТИКИ УЧНІВ ЛІЦЕЇВ

2.1. Еволюція та сучасний стан розвитку методичної системи навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти

У Словнику іншомовних слів вказано, що *методика* (грец. *μεθοδικά*) – 1) розділ педагогіки, що вивчає й складає правила і методи викладання якогось навчального предмета; 2) узагальнення досвіду, способів, прийомів доцільного здійснення будь-якого завдання [163, с. 496].

Словник української мови щодо поняття *методика* містить такі тлумачення: 1) сукупність взаємозв'язаних способів та прийомів доцільного проведення будь-якої роботи; 2) учення про методи викладання певної науки, предмета [164, с. 692].

У Великому тлумачному словнику української мови *методика* – це: 1) сукупність взаємопов'язаних способів та прийомів доцільного проведення будь-якої роботи; 2) документ, який описує послідовність методів, правил і способів виконання роботи; 3) вчення про методи викладання певної науки, предмета [74, с. 672].

Методичний, у Словнику іншомовних слів, – це той, що діє згідно з правилами методики, пов'язаний або належить до неї [163, с. 496].

У Словнику української мови *методичний* – це той, що: 1) стосується методики; 2) здійснюється за певним планом; дуже послідовний, систематичний [164, с. 693].

У Великому тлумачному словнику української мови *методичний* – це: 1) той, що стосується до методики; 2) той, що здійснюється за певним планом, дуже послідовний, систематичний [74, с. 672].

У Словнику іншомовних слів *система* (від грец. *συστήμα* – утворення, складення) – 1) порядок, зумовлений правильним розташуванням частин, стрункий ряд, зв'язане ціле; 2) сукупність принципів, покладених в основу

певного вчення; 3) форма суспільного устрою (напр., державна система); 4) форма, спосіб побудови, організація чогось (напр., виборча система); 5) сукупність господарських одиниць, установ, організаційно об'єднаних у єдине ціле (напр., система кооперації); 6) сукупність частин, пов'язаних спільною функцією (напр., серцево-судинна система) [163, с. 707].

У Словнику української мови *систему* окреслено як: 1) порядок, зумовлений правильним, планомірним розташуванням та взаємним зв'язком частин чого-небудь, продуманий план, наведений, прийнятий порядок; 2) класифікація; 3) форма організації, будова чого-небудь (державних, політичних, господарських одиниць, установ і т. ін.), форма суспільного устрою; формація; 4) сукупність яких-небудь елементів, одиниць, частин, об'єднаних за спільною ознакою, призначенням; 5) сукупність принципів, які є основою певного вчення, сукупність способів, методів, прийомів здійснення чого-небудь; 6) будова, структура, що становить єдність закономірно розташованих та функціонуючих частин [165, с. 203].

У Великому тлумачному словнику української мови *система* – це: 1) порядок, зумовлений правильним, планомірним розташуванням і взаємним зв'язком частин чого-небудь; 2) класифікація; 3) форма організації, будова чого-небудь; 4) сукупність яких-небудь елементів, одиниць, частин, об'єднаних за спільною ознакою, призначенням; 5) сукупність принципів, що є основою певного вчення; 6) будова, структура, що становить єдність закономірно розташованих та функціонуючих частин; 7) сукупність шарів гірських порід, що характеризується певними викопними фауною і флорою [74, с. 1329].

Методика навчального предмета досліджує закономірності навчання певного предмета, розкриває цілі навчання предмета, його значення для розвитку здобувача освіти [85, с. 494-495].

Із наведених визначень *методика, методичний, система, методика навчального предмета*, доцільно погодитися з твердженням Н. С. Пономаревої, що *методика* – це система методів навчання, що забезпечують вирішення завдань навчання, тому можна говорити про методичні системи в цілому та

методичні системи навчання, зокрема, *методичні системи навчання інформатики* [138, с. 118].

Тлумачення поняття «методична система навчання» у науково-педагогічній літературі пропонувалися в дослідженнях В. Г. Криська [104], О. М. Новікова [126], В. Л. Ортинського [128], А. М. Пишкала [153] та ін.

А. М. Пишкало [153, с. 7] вперше зазначив, що під *методичною системою навчання* будь-якого предмета (дисципліни) розуміється ієрархічно упорядкована, цілісна, орієнтована на досягнення цілей навчання структура п'яти взаємопов'язаних компонентів: цілей, змісту, методів, засобів навчання та організаційних форм.

На основі наведеного були запропоновані й інші підходи до тлумачення поняття «методична система навчання».

В. Г. Крисько [104, с. 322] тлумачить *методичну систему навчання* як впорядковану сукупність взаємопов'язаних і взаємообумовлених методів, форм і засобів планування і проведення, контролю, аналізу, коригування освітнього процесу, спрямованих на підвищення ефективності навчання школярів.

О. М. Новіков [126] під *методичною системою навчання* розуміє загальну спрямованість навчання, що завжди будується на визначеній композиції методів з урахуванням конкретних цілей, умов і обставин навчання. Дослідник також зазначає, що не існує універсальної методичної системи навчання.

На думку В. Л. Ортинського [128, с. 192] *методична система навчання* повинна розумітися як «єдність цілей, змісту, внутрішніх механізмів, методів і засобів конкретного способу навчання».

Отже, враховуючи наведені тлумачення, слід зауважити, що методична система навчання є єдністю компонентів – цілей, змісту, методів, засобів і форм організації навчання. Методична система змінюється (розвивається) під впливом соціально-культурних процесів, досягнень (або розвитку) відповідної наукової галузі, а зміна хоча б одного з компонентів викликає зміну інших компонентів системи.

Методична система навчання інформатики в закладах загальної середньої

освіти є досить молодою (бере свій початок з 1985-1986 навчального року), а також динамічною відповідно до стрімкого розвитку в галузі інформаційних технологій та освіти.

Проаналізувавши роботи О. І. Бочкіна [71], О. А. Кузнєцова [105], М. П. Лапчика [106], В. В. Малєва [113], Н. В. Морзе [118], І. Г. Семакіна [159], у становленні та розвитку методичної системи навчання інформатики у школі, можна виділити чотири етапи, беручи до уваги зміни цілей, змісту та апаратно-програмних засобів навчання інформатики.

Перший етап розвитку методичної системи навчання інформатики (орієнтовно 1985-1996 рр.) починається із введенням до шкільної програми предмету «Основи інформатики та обчислювальної техніки» упродовж двох останніх років здобуття повної загальної середньої освіти (у той час 9 і 10 класи). Із аналізу змісту чинних на той час програм [132; 171] та методичних посібників [75; 88; 92; 175] стає зрозумілим, що *метою* вивчення інформатики цього періоду було формування та розвиток складових *комп'ютерної грамотності*.

У пояснювальній записці до першої навчальної програми предмету (1985 р.) під *комп'ютерною грамотністю* розумівся певний набір теоретичних знань та практичних умінь. До теоретичних знань віднесено: знання способів представлення основних характеристик об'єкта у вигляді, що задовольняє вимоги комп'ютерного дослідження математичної моделі; знання типів алгоритмів; знання елементів і синтаксису алгоритмічної мови (орієнтованої на людину); знання однієї з мов програмування (орієнтованої на машину) та уявлення про програмне забезпечення і пакети прикладних програм. До практичних умінь віднесено вміння здійснювати алгоритмізацію, програмування та розв'язання навчальних задач на ЕОМ [132].

На початку навчання предмету «Основи інформатики та обчислювальної техніки» (1985-1991 роки) здійснювалося переважно в безмашинному варіанті або із залученням програмованих калькуляторів. І лише згодом, у школах почалося масове використання персональних ЕОМ – «Електроніка», «Корвет», «Вектор» (СРСР), «Yamaha» (Японія), «Robotron» (Німецька Демократична

Республіка) тощо [89; 113; 171].

Зміст курсу «Основи інформатики та обчислювальної техніки» [132, с. 7] був розрахований у дев'ятому класі (перший рік вивчення) на 34 години, а в десятому класі було передбачено два варіанти залежно від можливостей організації практичної роботи учнів на ЕОМ: неповний (безмашинний) – 34 години і повний (машинний) – 68 годин. Теоретична частина була однаковою, а додаткові години використовувалися для розв'язування задач на ЕОМ.

До навчального змісту предмету «Основи інформатики та обчислювальної техніки» були включені розділи, представлені у табл. 2.1.

У методичному посібнику 1985 року для вчителів та викладачів складовими змісту *комп'ютерної грамотності* зазначаються:

- алгоритмічна культура (поняття про алгоритм, його властивості, засоби, методи опису алгоритмів, програма як форма подання алгоритму для ЕОМ; основи програмування однією з мов програмування; практичні навички роботи на ЕОМ);

- принцип дії та будова ЕОМ і її основних елементів;

- застосування та роль комп'ютерів на виробництві й інших галузях діяльності людини [92, с. 8].

В. А. Каймін та М. Д. Угринович пропонували розуміти *комп'ютерну грамотність* як уміння читати, писати, рахувати, малювати, працювати з інформацією за допомогою ЕОМ [96, с. 18].

В. М. Касаткін стверджував, що для учня оволодіти *комп'ютерною грамотністю* означає засвоїти етапи підготовки задач до їх розв'язування на ЕОМ та основні ідеї комп'ютерного моделювання, оволодіти алгоритмічною мовою, навчитися програмувати однією або кількома мовами, працювати на персональній ЕОМ або ЕОМ іншого класу [97, с. 17].

На даному етапі найбільша частина змісту навчання інформатики (понад 70%) стосувалася засвоєння знань з основ алгоритмізації (ставилася мета показати можливість автоматизації діяльності людини на основі алгоритму) та набуття умінь будувати і реалізовувати базові алгоритми алгоритмічною мовою,

яка розглядалася як проміжна ланка між мовами програмування і відомими традиційними способами опису алгоритмів. Сформувався перші змістові лінії шкільного курсу інформатики – «Основи алгоритмізації», «Основи програмування», «Моделі та моделювання».

Таблиця 2.1

Витяг з програми навчального предмету
«Основи інформатики та обчислювальної техніки»
(термін чинності: вересень 1985 – травень 1996 року) [132]

Назва тематичного розділу	Кількість навчальних годин	Основна мета
9 клас (перший рік вивчення інформатики)		
Вступ	2	розкриття змісту інформатики як науки та взаємозв'язку інформатики і обчислювальної техніки
Алгоритми. Алгоритмічна мова	6	дати уявлення про алгоритми і засоби їх опису
Алгоритми роботи з величинами	10	сформувати уявлення про типи величин, про надання величині значень, про проміжні величини, про процеси розгалуження та повторення
Побудова алгоритмів для розв'язку задач	16	практичні навички побудови алгоритмів
Разом у 9 класі	34	
10 клас (другий рік вивчення інформатики, безмашинний варіант)		
Принципи будови і роботи ЕОМ	12	ознайомити учнів з принципами функціонування основних елементів ЕОМ та з особливостями покоління ЕОМ
Знайомство з програмуванням	16	дати школярам уявлення про одну з мов програмування високого рівня, навчити розрізняти основні алгоритмічні конструкції
Роль ЕОМ у сучасному суспільстві. Перспективи розвитку обчислювальної техніки	2	узагальнити уявлення учнів про ефективність використання ЕОМ у різних галузях діяльності людини
Експерсії на обчислювальний центр	4	ознайомити учнів з обчислювальною технікою, організацією роботи на ЕОМ
Разом за 10 клас	34	

Усі навчальні посібники першого етапу розвитку методичної системи навчання інформатики мали програмістський ухил, «хоч з поступовим розповсюдженням персональних комп'ютерів та їх програмного забезпечення як загального так і спеціального призначення все більше ставало зрозумілим, що

вміти працювати з комп'ютером потрібно навчити всіх учнів, у той час як програмувати будуть далеко не всі з них (можливо 3% – 5%)» [87, с. 10].

До кінця першого етапу все більш важливого значення набувають питання формування та розвитку *інформаційної культури*, що і стало основною метою навчання інформатики **на другому етапі розвитку методичної системи**, починаючи з середини 90-х років ХХ століття.

У філософському словнику *інформаційна культура* визначається як «складова частина загальної культури суспільства і людини, сукупність усіх видів інформаційно-комунікативної діяльності та результати діяльності. Основою ж інформаційної культури особи є знання про оточуюче інформаційне середовище, закони його функціонування та розвитку, а головне вміння орієнтуватися в безмежності сучасного світу інформації. Інформаційна культура закріплюється у матеріальних і духовних цінностях, знакових системах, найновіших інформаційних технологіях, акумулюючи в них певні знання, значення, творчі здібності, уміння людини й забезпечуючи їх соціальне наслідування» [59, с. 344].

Ю. С. Рамський стверджує, що поняття *інформаційна культура* з'являється із «становленням інформаційного суспільства, основною особливістю якого є переважання інформаційної діяльності в усіх сферах суспільного виробництва, у мистецтві, бізнесі, освіті, і здійснення інформаційної взаємодії на основі інформаційних і комунікаційних технологій; інформаційна культура як складова культури як такої є фундаментальним виміром життя в постіндустріальному суспільстві» [154, с. 33].

М. О. Антонченко зазначає, що «*інформаційна культура людини* – це системне утворення особистості, яке інтегрує знання про основні методи інформаційних технологій, уміння використовувати наявну інформацію для вирішення прикладних завдань, навички використання персонального комп'ютера і технологій зв'язку, здібності представити інформацію в зрозумілій для усіх формі, орієнтує на розширення та поновлення знань. Якщо представити це поняття в стислій формі, то інформаційна культура людини – це інтеграція

здібностей, навичок, знань, ціннісних орієнтацій особистості, які детермінують свідоме намагання до придбання нових знань» [60, с. 162].

За тлумаченням Т. М. Бараболіної *інформаційна культура* – це система правил поведінки людини в інформаційному суспільстві, критерій рівня розуміння і сприйняття світу, адекватного визначення людиною свого місця в ньому [62, с. 20].

Н. В. Морзе, В. П. Вембер та О. Г. Кузьмінська пояснюють *інформаційну культуру* як «вміння цілеспрямовано працювати з інформаційними даними та використовувати для їх отримання, опрацювання та передавання інформаційно-комунікаційні технології, сучасні технічні засоби та методи» [117, с. 23]. При чому ключова роль у формуванні інформаційної культури учнів належить інформатиці.

В експериментальній (1993 р.) та удосконалених (1996 р. та 2001 р.) версіях програми шкільного курсу інформатики даного етапу (колектив авторів – М. І. Жалдак, Н. В. Морзе, Г. Г. Науменко, О. І. Мостіпан) були враховані природні зміни в апаратних і програмних складових сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, а програмування відходило на другий план [89, с. 4].

Залежно від рівня оснащення комп'ютерною технікою в остаточній версії програми [118, с. 52] пропонується два варіанти розподілу основних тем курсу, орієнтованих на використання комп'ютерів, що працюють під управлінням операційних систем Windows та MS-DOS відповідно (табл. 2.2).

На даному етапі обов'язковий освітній мінімум шкільного курсу інформатики доповнений новими тематичними розділами, а саме: «Операційні системи», «Основи роботи з дисками», «Прикладне програмне забезпечення загального призначення», «Прикладне програмне забезпечення навчального призначення» та згодом «Глобальна мережа Інтернет та можливості її використання». Сформувалися нові змістові лінії курсу інформатики – «Системне програмне забезпечення ЕОМ», «Прикладне програмне забезпечення» та «Комп'ютерні мережі. Служби та сервіси глобальної мережі Інтернет». Кількість навчальних годин на вивчення основ алгоритмізації та

програмування було зменшено з 48 до 12 для класів універсального профілю (що становило 70 % та 17 % від загальної кількості годин відповідно).

Таблиця 2.2

**Узагальнений витяг з програм навчального предмету
«Інформатика» для класів універсального профілю та профілів
природничо-математичного та технологічного напрямів
(термін чинності: вересень 2001 – травень 2010) [94]**

Назва навчального розділу (теми)	Розподіл навчальних годин					
	для класів універсального (загальноосвітнього) профілю		для класів профілів природничо-математичного та технологічного напрямів			
	10 клас	11 клас	1 варіант (під управлінням ОС Windows)		2 варіант (під управлінням ОС MS-DOS)	
			10 клас	11 клас	10 клас	11 клас
Вступ. Інформація та інформаційні процеси	2		3		3	
Інформаційна система та її складові	6		4		4	
Операційні системи			8		10	
Основи роботи з дисками			5		5	
Прикладне програмне забезпечення навчального призначення	4		4	2	4	2
Прикладне програмне забезпечення загального призначення	14	20	42		40	
<i>Графічний редактор</i>	4		4		4	
<i>Текстовий редактор</i>	10		12		12	
<i>Комп'ютерні презентації</i>			4			
<i>Табличний процесор</i>		2	13		13	
<i>БД. Системи управління базами даних</i>		10	10		12	
Глобальна мережа Інтернет та можливості її використання	6			16		14
Комп'ютерне моделювання. Основи алгоритмізації та програмування		12		46		48
<i>Інформаційна модель</i>		2		2		2
<i>Алгоритми</i>		2		7		7
<i>Програма. Мова програмування</i>		2		8		8

Назва навчального розділу (теми)	Розподіл навчальних годин					
	для класів універсального (загальноосвітнього) профілю		для класів профілів природничо-математичного та технологічного напрямів			
	10 клас	11 клас	1 варіант (під управлінням ОС Windows)		2 варіант (під управлінням ОС MS-DOS)	
			10 клас	11 клас	10 клас	11 клас
<i>Звернення до алгоритмів і функцій</i>		2		5		5
<i>Вказівки повторення й розгалуження</i>		4		9		10
<i>Табличні величини</i>				8		8
<i>Рядкові величини</i>				4		3
<i>Вказівки створення графічних зображень</i>				3		5
Резерв	3	3	6	6	6	6
Усього	35	35	70	70	70	70
Разом	70		140		140	

Слід зазначити, що на цьому етапі розвитку методичної системи навчання інформатики могли бути використані для вивчення інформатики й інші програми, рекомендовані Міністерством освіти і науки України [94], наприклад:

– для загальноосвітніх навчальних закладів (класів) технологічного профілю (укладачі: Т. І. Астісова та С. М. Дзюба);

– для загальноосвітніх навчальних закладів фізико-математичного, природничого та технологічного профілів (укладачі: М. І. Жалдак, Н. В. Морзе, О. І. Мостіпан та Г. Г. Науменко);

– для спеціалізованих шкіл, гімназій, ліцеїв (укладачі: Н. В. Голубнича, Т. П. Караванова та В. П. Костюков).

У програмі з інформатики для загальноосвітніх навчальних закладів (класів) технологічного профілю (укладачі: Т. І. Астісова та С. М. Дзюба [94, с. 85]) передбачався обов'язковий освітній мінімум підготовки учнів з інформатики та інформаційних технологій у 7–9 класах за рахунок варіативної частини навчального плану. У наступних 10 і 11 класах учням для вивчення пропонувався інтегрований курс «Інформатика та технології» за одним із вузькоспеціалізованих напрямів: «Комп'ютерні технології автоматизованого проектування», «Об'єктно-орієнтовані мови програмування, використання

табличного процесора у сфері економіки та бізнесу», «Веб-дизайн», «Архітектурне та ландшафтне проектування» [94, с. 86].

У навчальній програмі поглибленого курсу (укладачі: М. І. Жалдак, Н. В. Морзе та О. І. Мостіпан) було передбачено вивчення інформатики упродовж 4 років (з 8 по 11 клас) з такого розрахунку годин: 8-9 клас (перший ступінь) – 2 години на тиждень (всього 140 годин), 10-11 клас (другий ступінь) – 4 години на тиждень (всього 280 годин) [94, с. 140]. У 8-9 класах учні засвоювали фундаментальні основи загальноосвітнього курсу інформатики, набували початкових умінь та навичок роботи на комп'ютерах, користування програмним забезпеченням, розроблення програм мовами програмування (процедурного). Особлива увага приділялася формуванню логічного (математичного, алгоритмічного, операційного) мислення учнів, розвитку їх творчого потенціалу. У 10-11 класах здійснювалося поглиблення та розширення змісту базового курсу, посилення його прикладного спрямування, розв'язування завдань підвищеної складності та виконання творчих завдань (самостійне розроблення програмних засобів).

Вивчення інформатики та програмування у 8-11 класах спеціалізованих шкіл, гімназій, ліцеїв за відповідною програмою (укладачі: Н. В. Голубнича, Т. П. Караванова та В. П. Костюков), що в першу чергу передбачало розширення і поглиблення розділу алгоритмізації та програмування, здійснювалося в обсязі 4 години на тиждень, починаючи з першого року вивчення. На думку авторів програми, саме такий підхід надавав можливість вчасно здійснювати ґрунтовну та якісну підготовку учнів до участі в олімпіадах, конкурсах, турнірах, науково-практичних конференціях, конкурсах-захистах науково-дослідницьких робіт різного рівня [94, с. 240].

Для отримання додаткових знань із сучасних мов програмування та навичок роботи із прикладними програмними продуктами в навчальному закладі учням пропонувалися факультативи та спецкурси: «Основи інформаційних технологій» (10-11 класи) [94, с. 245], «Основи програмування» (10-11 класи) [94, с. 250], «Курс користувача» (7-9 класи) [94, с. 256], «Формальна логіка»

(8-11 класи) [94, с. 260], «Мова розмітки гіпертексту HTML» (10-11 класи) [94, с. 265], «Програмування Інтернет-орієнтованої графіки» (10 клас) [94, с. 268], «Школа олімпійського резерву з програмування» (9-11 класи) [94, с. 272], «Інформаційна культура» (10-11 класи) [94, с. 279], «Вступ до інформатики» (5-6 класи) [94, с. 281], «Прикладна математика» (8-11 класи) [94, с. 284].

Упродовж другого етапу розвитку методичної системи навчання інформатики в освітніх закладах набула поширення комп'ютерна техніка переважно третього, а пізніше четвертого, покоління закордонного виробництва із процесорами Intel 486, Celeron, Pentium [83; 118]

У 2004 році було затверджено перший Державний стандарт базової і повної середньої освіти [143], що визначив напрями та завдання формування компетентностей учнів (зокрема, соціальної, комунікативної, комп'ютерної тощо). Згідно цього стандарту навчальний предмет «Інформатика» був віднесений до освітньої галузі «Технології», а його вивчення у першому періоді (до прийняття нового освітнього стандарту у 2011 році, а саме з вересня 2009 до травня 2013) здійснювалося на двох рівнях – допрофільному (9 клас) та профільному (10-11 класи) за програмами рівня стандарту, академічного та профільного. Основною метою навчання інформатики (згідно навчальної програми з інформатики для 9 класів загальноосвітніх навчальних закладів 2009 р. [91]) було «формування у випускників основної школи основ *інформаційної культури та інформатично-комунікативної компетентності*» (або *інформатичної компетентності* (за Н. В. Морзе, В. П. Вембер і О. Г. Кузьмінською [117], за Й. Я. Ривкіндом, Т. І. Лисенко, Л. А. Черніковою та В. В. Шакотьком [156], за М. С. Голованєм [80], за М. С. Богачик [68]), або *інформаційно-комунікаційно-технологічної* (за О. В. Овчарук та О. М. Спіріним [131]), або *інформаційної* (за О. І. Мироною [115]), або *інформаційно-технологічної* (за П. В. Беспаловим [65]), або *інформаційно-комунікаційної* (за Т. Пушкарьовою [152]), або *інформаційно-комунікативної* [173], або *інформаційно-комп'ютерної* [82; 102]).

Тлумачення зазначених термінів суттєво не відрізняються одне від одного

та досить часто мають тотожне трактування.

Н. В. Морзе, В. П. Вембер та О. Г. Кузьмінська зазначають, що *інформатична компетентність* «передбачає здатність людини орієнтуватися в інформаційному просторі, оперувати інформаційними даними на основі використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій відповідно до потреб ринку праці для ефективного виконання професійних обов'язків. Для учнів *інформатична компетентність* може означати сформовані вміння ефективно використовувати ІКТ для навчання» [117, с. 23].

За Й. Я. Ривкіндом, Т. І. Лисенко, Л. А. Черніковою та В. В. Шакотьком «*інформатична компетенція* передбачає наявність у людини знань, умінь і навичок у галузі інформатики і здатність розв'язувати необхідні (у тому числі й нові) теоретичні і практичні задачі з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій» [156, с. 27]. При чому, вимога сьогодення – постійно підвищувати рівень своєї інформаційної культури, розвитку якої сприяє *інформатична компетентність*.

О. В. Овчарук та О. М. Спірін визначають *інформаційно-комунікаційно-технологічну компетентність*, або ІКТ-компетентність, як підтверджену здатність особистості використовувати на практиці інформаційно-комунікаційні технології для задоволення власних індивідуальних потреб і розв'язування суспільно значущих, зокрема професійних, задач у певній предметній галузі [166, с. 46].

І. Р. Кац (Irvin R. Katz) з групою дослідників наводять тлумачення *інформаційно-комунікаційної грамотності (ICT literacy)* як можливості належним чином використовувати цифрові технології, засоби комунікації та/або мережі для вирішення інформаційних проблем з метою функціонування в інформаційному суспільстві. Це включає можливість використання технології як інструменту для дослідження, організації і передавання інформації та фундаментального розуміння етичних/правових питань, пов'язаних із доступом до інформації та її використанням [26].

Вивчення інформатики у 9 класах (із розрахунку 1 година на тиждень,

35 годин на рік) здійснювалося за такими тематичними розділами «Інформація. Інформаційні процеси та системи», «Апаратне забезпечення інформаційних систем», «Системне програмне забезпечення», «Службове програмне забезпечення», «Комп'ютерні мережі», «Основи роботи з текстовою інформацією» та «Комп'ютерна графіка» [91, с. 375]. Узагальнені відомості щодо вивчення інформатики у старшій профільній школі (за програмами різних рівнів, чинних з вересня 2010 до травня 2018) подано у табл. 2.3.

Для другого етапу розвитку методичної системи навчання шкільної інформатики також характерне впровадження курсів за вибором. Курси за вибором – це навчальні курси, які входять до складу профілю навчання та створюються за рахунок варіативного (шкільного та регіонального) компонента змісту освіти. Основні функції курсів за вибором: поглиблення і розширення змісту профільних предметів або забезпечення профільної прикладної і початкової професійної спеціалізації навчання [99]. На думку В. Д. Руденка, курси за вибором відіграють важливу роль у профілізації освіти, а зростання кількості таких курсів, розширення їх тематики є позитивним і корисним. Проте актуальною залишається проблема методичної допомоги вчителю при викладанні курсів за вибором [158, с. 5].

Третій етап розвитку методичної системи навчання інформатики розпочинається із затвердженням у 2011 році Державного стандарту базової та повної загальної середньої освіти [144] (далі Стандарт-2011), у якому продовжено реалізацію компетентнісного, особистісно зорієнтованого та діяльнісного підходів, а також забезпечено вивчення інформатики і, відповідно, розвиток цифрової компетентності на всіх рівнях середньої освіти.

У Стандарті-2011 про інформаційно-комунікаційну компетентність йдеться, по-перше, як про ключову компетентність, що окреслює певний рівень знань, умінь, навичок, ставлень, які можна застосувати у сфері діяльності людини, по-друге, як про предметну або галузеву, що визначає сукупність знань, умінь та характерних рис у межах змісту конкретного предмета, необхідних для виконання учнями певних дій з метою розв'язання навчальних проблем, задач, ситуацій.

Таблиця 2.3

**Узагальнений витяг з програм навчального предмету «Інформатика»
для 10-11 класів (термін чинності: вересень 2010 – травень 2018) [147]**

Назва навчального розділу (теми)	Розподіл навчальних годин					
	за програмою рівня стандарту (зокрема для класів фізико-математичного та технологічного профілів)		за програмою академічного рівня (зокрема для класів універсального, математичного, фізико-хімічного профілів)		за програмою профільного рівня (для класів інформаційно-технологічного профілю)	
	10 клас	11 клас	10 клас	11 клас	10 клас	11 клас
Інформаційні технології у навчанні	4		2	8		
Текстовий процесор	8		7		16	
Комп'ютерні презентації та публікації	12		6			22
Служби Інтернету	7		6		4	
Комп'ютерна графіка					16	
Системи опрацювання табличних даних		11	11		30	
Бази даних. Системи управління базами даних		9		12		26
Інформаційні технології персональної та колективної комунікації		8		16		
Моделювання. Основи алгоритмізації		5				
Основи алгоритмізації та програмування				28	102	
Методи побудови алгоритмів						22
Основи об'єктно-орієнтованого проектування						10
Основи веб-дизайну						24
Програмування графіки та мультимедіа						16
Автоматизація роботи в офісних програмах за допомогою VBA						15
Інформаційні технології у проектній діяльності						32
Резерв часу	4	2	3	6	7	8
Разом за навчальний рік	35	35	35	70	175	175
Разом	70		105		350	

Формування інформаційно-комунікаційної компетентності учнів

здійснюється при вивченні всіх предметів навчального плану, при чому в навчальних програмах кожного з них неодмінно передбачається внесок у її формування.

Починаючи з вересня 2013 року вивчення інформатики здійснюється на трьох рівнях – пропедевтичному (початкова школа – 2-4 класи), допрофільному (основна школа – 5-9 класи) та профільному (старша школа – 10-11 класи).

Згідно затвердженої навчальної програми для загальноосвітніх навчальних закладів з інформатики для 5-9 класів, складеної відповідно до Стандарту-2011, було збережено перелік предметних змістових ліній, виокремлених на попередніх етапах: «Інформація, інформаційні процеси, системи, технології», «Комп'ютер як універсальний пристрій для опрацювання даних», «Телекомунікаційні технології», «Інформаційні технології створення й опрацювання інформаційних об'єктів», «Моделювання, алгоритмізація й програмування». Слід звернути увагу, що відтепер початок обов'язкового вивчення програмування текстовою мовою в межах змістової лінії «Моделювання, алгоритмізація й програмування» припадає на 7 клас. У 8-9 класах передбачалося вивчення основ подійно- та об'єктно-орієнтованого програмування [120]. На попередніх етапах розвитку методичної системи інформатики вивчення програмування текстовою мовою передбачалося лише у старшій школі.

Згідно Стандарту-2011 та відповідної Типової освітньої програми для 10-11 класів (за виключенням класів інформаційно-технологічного профілю) предмет «Інформатика» включено до переліку обов'язково-вибіркових предметів, разом з предметами «Технології» та «Мистецтво». При цьому, з вересня 2018 року до робочих навчальних планів включаються лише два з трьох перелічених предметів, а один не вивчається взагалі. У разі вибору, вивчення інформатики у старшій школі (10 та/або 11 класах) здійснюється в обсязі мінімум 105 навчальних годин на два навчальні роки (за однією із обраних схем: або 1 година у 10 класі та 2 години в 11, або всі 3 години в 11 класі, або порівну – по 1,5 години у кожному класі тощо) за програмою рівня стандарту, що включає

один обов'язковий для вивчення *базовий* модуль (загальна кількість навчальних годин – 35; табл. 2.4). Базовий модуль складається з 4 тем: «Інформаційні технології в суспільстві», «Моделі і моделювання. Аналіз та візуалізація даних», «Системи керування базами даних», «Мультимедійні та гіпертекстові документи». У програмі рівня стандарту з навчального предмету «Інформатика» не встановлюється фіксована кількість годин та порядок вивчення тем у рамках навчального року, а лише зазначається зміст навчального матеріалу, вивчення якого є об'єктом тематичного оцінювання.

Таблиця 2.4

**Розподіл годин відповідно програми рівня стандарту
навчального предмету «Інформатика», базовий модуль
(чинність – з вересня 2018)**

Назва навчального розділу (теми)	Розподіл навчальних годин					
	за підручником, авторський колектив якого очолює				календарно-тематичне планування	
	Й. Я. Ривкінд [155]	В. Д. Руденко [157]	Н. В. Морзе [116]	О. О. Бондаренко [70]	О. В. Пасічник [134]	І. О. Завадський [90]
Інформаційні технології в суспільстві	6	7	8	8	6	4
Моделі і моделювання. Аналіз та візуалізація даних	6	7	5	11	9	6
Системи керування базами даних	5	5	6	6	7	17
Мультимедійні та гіпертекстові документи	4	7	6	5	9	8
Резерв	14	9	10	5	4	
Разом	35	35	35	35	35	35

Базовий модуль доповнюють *вибіркові* модулі («Графічний дизайн», «Комп'ютерна анімація», «Тривимірне моделювання», «Математичні основи інформатики», «Інформаційна безпека», «Веб-технології», «Основи електронного документообігу», «Бази даних», «Формальна логіка», «Комп'ютерні технології опрацювання звукової інформації», «Креативне програмування») [93].

З вересня 2018 р. для вивчення інформатики у старшій школі на

профільному рівні передбачено 350 навчальних годин (175 годин на рік, по 5 – на тиждень упродовж 2 років). Зміст навчальної програми з інформатики для учнів 10-11 класів профільного рівня представлений переліком основних розділів:

– 10 клас – «Мова програмування та структури даних», «Сучасні інформаційні технології», «Аналіз і візуалізація даних», «Графіка/мультимедіа», «Електронні публікації»;

– 11 клас – «Бази даних», «Алгоритми», «Веб-технології», «Парадигми та технології програмування» [121].

Порядок вивчення тем та кількість навчальних годин для тематичного розділу учитель визначає самостійно. Програма курсу з інформатики для 10-11 класів профільного рівня за основними розділами і компетентностями збігається зі змістом основного і вибіркового модулів.

Актуальною на даному етапі, як і на попередніх, залишається проблема наявності у школах сучасної комп'ютерної техніки, відповідність її сучасності. Наголошується на обов'язковому використанні ліцензованого системного і програмного забезпечення або такого, що розповсюджується за вільними або відкритими ліцензійними угодами. Набуває поширення використання хмарних технологій для вивчення окремих тем інформатики.

Програмою вивчення інформатики у 5–9 класах (за Стандартом-2011) не обмежувалося використання вчителем різних видів апаратного та програмного забезпечення за умови відповідності його вимогам програми. Для успішного виконання вимог програми рекомендовано підключення комп'ютерного класу до швидкісного Інтернету. Вибір певних операційних систем, програмних та апаратних платформ, програмних засобів дозволено здійснювати вчителю.

Наразі **триває четвертий етап розвитку методичної системи навчання інформатики**. Він розпочався у 2018 році із уведенням першої частини Державних стандартів загальної середньої освіти – Державного стандарту початкової освіти [145]. Другою частиною Державних стандартів загальної середньої освіти є Державний стандарт базової середньої освіти [141].

У цих стандартах наведений перелік компетентностей, подібний до європейського першоджерела – Рекомендації Європейського Парламенту та Ради Європи щодо формування ключових компетентностей освіти впродовж життя. Формування та розвиток кожної ключової компетентності, зазначеної у стандартах, відбувається наскрізно через усі освітні галузі.

За Державним стандартом початкової освіти [145] *інформаційно-комунікаційна компетентність* передбачає опанування основою цифрової грамотності для розвитку і спілкування, здатність безпечного та етичного використання засобів інформаційно-комунікаційних технологій у навчанні та інших життєвих ситуаціях.

За Державним стандартом базової середньої освіти [141] *інформаційно-комунікаційна компетентність* передбачає впевнене, критичне і відповідальне використання цифрових технологій для власного розвитку і спілкування; здатність безпечно застосовувати інформаційно-комунікаційні засоби в навчанні та інших життєвих ситуаціях, дотримуючись принципів академічної доброчесності.

Характерною ознакою четвертого етапу розвитку методичної системи навчання інформатики є широке використання мобільного навчання, що передбачає навчання за допомогою мобільних пристроїв та безпроводних мереж. Мобільне навчання відбувається не в класі, а у деякому іншому навчальному просторі. Проте концепція класу як комунікативного середовища не зникає – класи перестають бути сталим утворенням і стають динамічними, з можливістю формування на кожен предмет окремо. Час для навчання є питанням особистого вибору здобувача [160, с. 218].

Проведений аналіз розвитку методичних систем навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти надав можливість зробити наступні висновки:

1. Перехід від однієї методичної системи до іншої виконувався через комплексну зміну цілей навчання, змісту та засобів навчання інформатики.
2. Цілі навчання еволюціонували від набуття комп'ютерної грамотності

через формування інформаційної культури та інформатичних компетентностей до цифрових компетентностей громадянина України та Європи.

3. Зміст навчання розширювався від алгоритмізації й програмування через опанування інформаційних та інформаційно-комунікаційних технологій до інформатики як основи STEM-інтеграції.

4. Послідовність провідних засобів навчання інформатики на кожному етапі еволюції: навчальні комп'ютери, комп'ютерні засоби загального призначення, комп'ютерно-інформаційні мережі, мобільні комп'ютерні засоби.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку методичних систем навчання інформатики методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв має:

- 1) ґрунтуватись на розроблених у п. 1.3 компетентностях, що базуються на європейських стандартах;
- 2) бути спрямованою на інтеграцію природничих наук (фізики, математики, технологій та інженерії) для досягнення цілей навчання;
- 3) застосовувати мобільні технології доступу до найновішого апаратного і програмного забезпечення квантової інформатики.

2.2. Модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв

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* (В. Ю. Биков [66, 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 (педагогічно самостійний і функціонально завершений змістово-технологічний елемент методики навчання, її логіко-дидактична складова, для якої можуть бути однозначно встановлені (унормовані) такі атрибути: ціль навчання, зміст навчання, педагогічна технологія і термін навчання) може бути представлена у вигляді структурно-функціональної моделі (модель, що графічно відображає функціональні особливості структурних елементів певного процесу).

Всі компоненти структурно-функціональної моделі можуть об'єднуватися у різні блоки – основні (що є системотвірними) та додаткові (що забезпечують зв'язок основних). Як правило, основними блоками структурно-функціональних моделей нормативних методик навчання є цільовий, змістовий, технологічний та результативний блоки (Т. А. Вакалюк [73], П. П. Нечипуренко [124], В. Ф. Котубей [103]). Розглянемо докладніше основні компоненти – *цільовий* та *змістовий* блоки – побудованої структурно-функціональної моделі формування компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Енциклопедією освіти *цілі освіти* визначено як ідеальні прогнозовані результати педагогічної освітньої діяльності, що виступають безпосередніми мотивами її спрямування і регулювання. Цілями освіти є всебічний розвиток людини як особистості та найвищої цінності суспільства, розвиток її талантів, розумових і фізичних здібностей, виховання високих моральних якостей, формування громадян, здатних до свідомого суспільного вибору, забезпечення на цій основі інтелектуального, творчого, культурного потенціалу нації, підвищення освітнього рівня народу, забезпечення господарства кваліфікованими фахівцями [85, с. 989].

Цілі навчання (learning objectives) – це перелік того, що учень після завершення навчання за програмою навчального предмету (курсу, дисципліни тощо) має знати, розуміти та/або вміти демонструвати [12, с. 1950].

Основною метою навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв визначаємо формування їх компетентностей з основ квантової інформатики.

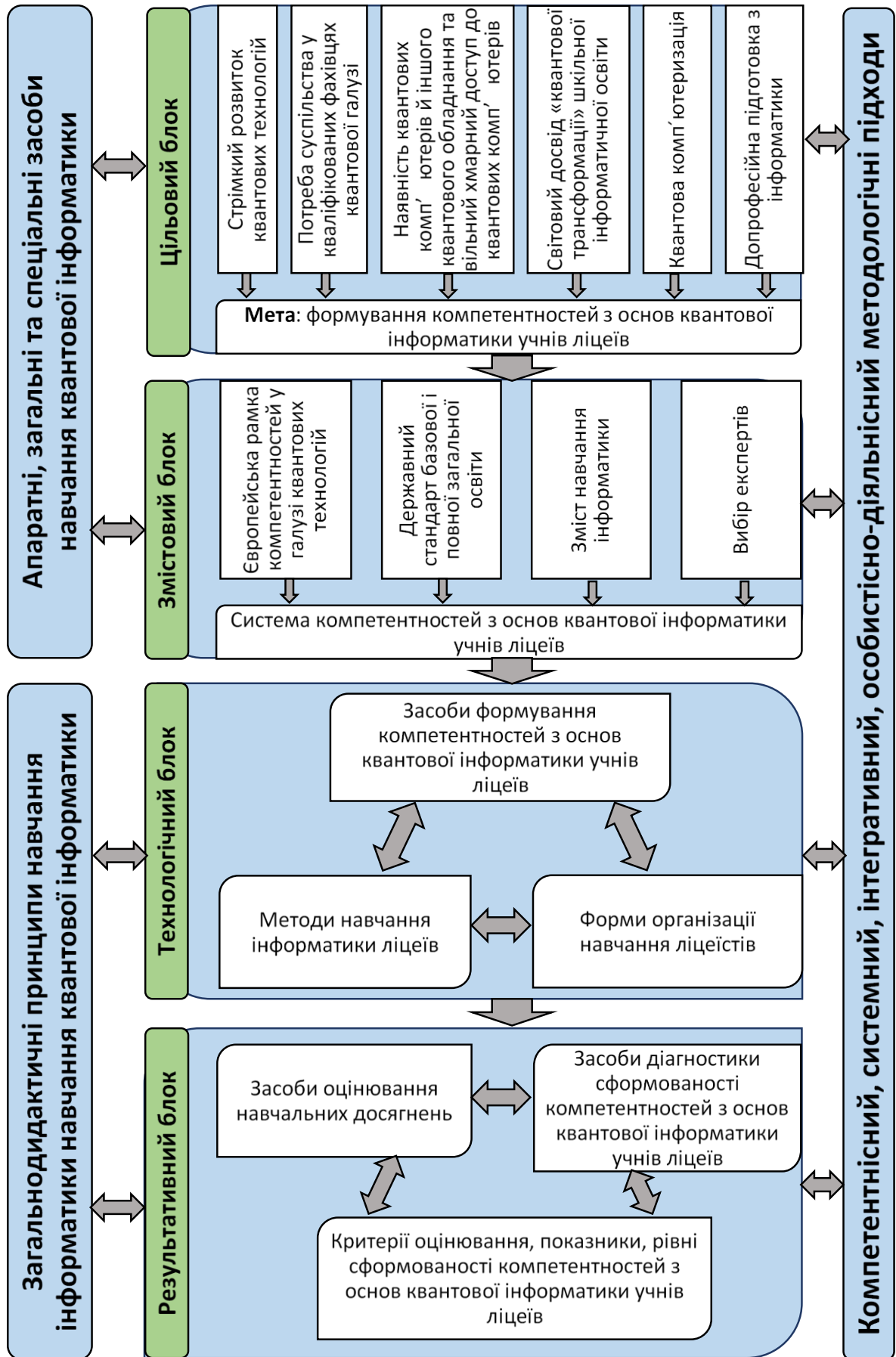


Рис. 2.1. Структурно-функціональна модель формування компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Досягнення цілей навчання передбачає виконання низки завдань.

Ключовим завданням навчання основ квантової інформатики є:

- формування понять «квантовий комп'ютер», «кубіт», «квантова суперпозиція», «квантовий вентиль», «квантовий алгоритм», «квантова схема», «квантова сплутаність (зв'язність, заплутаність)», «мова квантового програмування»;
- ознайомлення з історією становлення, поточним станом та перспективами розвитку квантової інформатики;
- ознайомлення з фізико-математичними засадами квантових обчислень;
- вивчення потенціалу та окреслення переваг квантових комп'ютерів для розв'язання окремих прикладних задач, задач моделювання складних систем різної природи тощо;
- реалізація базових квантових алгоритмів.

Для обґрунтування доцільності уведення 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 (Додаток В).

В опитуванні взяли участь 26 вчителів інформатики, які одночасно викладають хімію, трудове навчання та технології, математику. Переважна більшість опитаних вчителів мешкають у місті обласного підпорядкування. Вік учителів, які дали відповіді на питання анкети, був таким: 7,7% – до 25 років; 30,8% – 25-35 років, 42,3% – 35-45 років, 15% – 45-55 років; 3,8% – старші за 55 років.

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 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. Зміст навчання має відображати актуальний науковий зміст відповідної галузі, добирається з урахуванням низки критеріїв, подається системно та фіксується у навчальній програмі предмета (дисципліни, курсу тощо) [81; 112; 135].

Для добору змісту навчання основ квантової інформатики використовувалась система критеріїв, запропонована Ю. К. Бабанським [135]:

1. *Критерій цілісного відображення* у змісті навчання завдань формування всебічно розвиненої особистості. Для використання цього критерію застосовуються методи системно-структурного аналізу та експертної оцінки, які доводять, що у навчальній програмі представлені всі основні теорії, закони і

поняття, що дають досить цілісне уявлення про дану галузь науки; всі основні застосування цієї науки на виробництві, у суспільному й культурному житті; найважливіші практичні вміння; основні види діяльності, що забезпечують розвиток навичок самостійної роботи, пізнавальних інтересів, волі та емоцій школярів, а також їх різнобічне виховання.

2. *Критерій високої наукової і практичної значущості* змісту навчання. Застосування даного критерію передбачає, що шляхом експертної оцінки в програмі залишають більш універсальні й інформативні елементи змісту, абсолютно необхідні для розкриття сутності теорій, законів і основних понять, найбільш загальноновизнані в даній науці, більш політехнічні і широко застосовуються на практиці, що мають високу міжпредметну значимість, необхідні для подальшого навчання у вищій школі.

3. *Критерій відповідності складності змісту реальним навчальним можливостям школярів даного віку.* При використанні цього критерію застосовуються такі методи: діагностувальні контрольні роботи; аналіз результатів вступних випробувань до вишів; лабораторний експеримент, який доводить відсутність підвищеної стомлюваності учнів при повному і усвідомленому засвоєнні теми за відведений час.

4. *Критерій відповідності обсягу змісту навчання наявному часу на вивчення даного предмета.* Основними методами використання даного критерію є: лабораторний експеримент з фіксуванням витрат часу на повне й усвідомлене засвоєння матеріалу; фронтальні контрольні роботи з точним фіксуванням витраченого часу учнями на виконання завдання і з дозуванням допомоги невстигаючими учням. У результаті застосування цього критерію з первинного варіанту програми знімаються деякі менш важливі питання, довідкові дані, факти.

5. *Критерій врахування міжнародного досвіду* для побудови змісту навчання.

6. *Критерій відповідності змісту* наявній навчально-методичній та матеріальній базі сучасного закладу освіти.

Застосування таких критеріїв дозволяє виокремити у змісті навчання безпосередні основи навчального предмету, що можуть і повинні засвоїти здобувачі освіти за відведений час.

З метою уточнення змісту навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв, виявлення значущості складових Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій [17], отримання рекомендацій щодо змісту навчання шкільного курсу основ квантової інформатики було проведено опитування (Додаток Б) 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 (рис. 2.2).

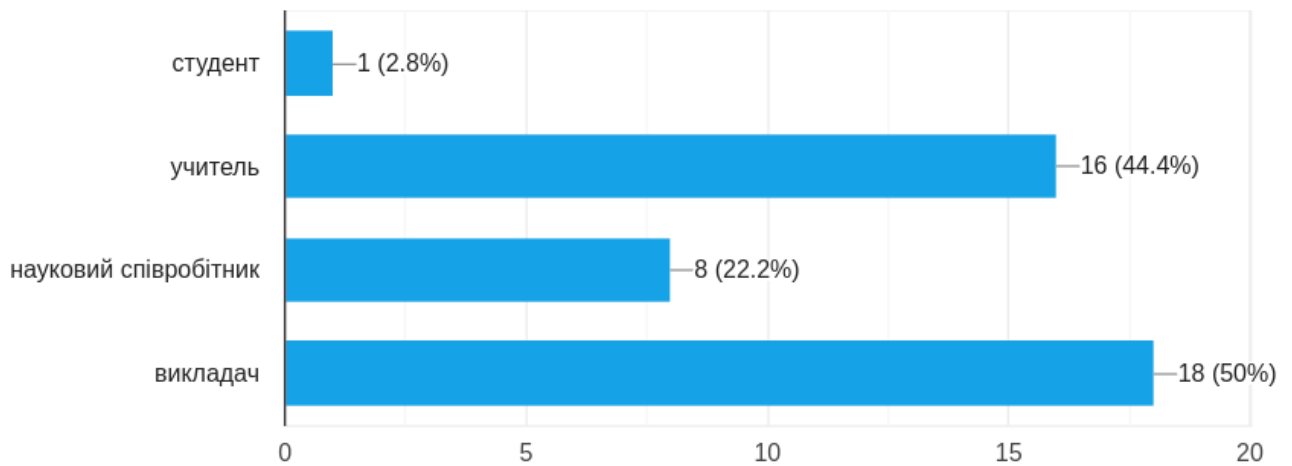


Рис. 2.2. Посада респондентів опитування

Кожному із респондентів було запропоновано виконати самооцінювання власного рівня компетентності у квантовій інформатиці. Глибокий рівень обізнаності з окремими складовими виявили 11,1 % респондентів, 41,7 % вказали на обізнаність з окремими складовими, а 47,2 % – на наявність початкових уявлень з квантової інформатики. Через складність та міждисциплінарний характер галузі жоден із респондентів не ідентифікував себе як особу, глибоко обізнану з усіма складовими, тому для опрацювання відповідей респондентів було визначено наступні вагові коефіцієнти для кожної з категорій опитаних (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

**Вагові коефіцієнти для рівнів компетентності у квантовій інформатиці
учасників опитування**

Категорія	Коефіцієнт, w
маю початкові уявлення	1
обізнаний з окремими складовими	2
глибоко обізнаний з окремими складовими	3
експерт	4

Більшість питань анкети передбачали оцінювання доцільності включення до змісту навчання різних знань та умінь з основ квантової інформатики за шкалою, поданою у табл. 2.6 – від «зовсім не важливо» (-1) до «дуже важливо» (+3). Ураховуючи наявність категорій учасників опитування, які не в повній мірі могли оцінити окремі компоненти через необізнаність у оцінюваних знаннях чи неволодіння відповідними вміннями, було передбачено тип відповіді «утрудняюсь відповісти», що кодувалась значенням 0.

Таблиця 2.6

Кодування відповідей учасників опитування

Відповідь	Кодування, a
зовсім не важливо	-1
утрудняюсь відповісти	0
мало важливо	1
скоріше, важливо	2
дуже важливо	3

До кожної з відповідей застосовувалась формула wa , де w – ваговий коефіцієнт, що відповідає рівню компетентності учасника експертного опитування (надалі експерта), a – код відповіді. Це надало можливість утричі збільшити вагу відповідей експертів, що глибоко обізнані з окремими складовими квантової інформатики порівняно з експертами, що мають початкові уявлення.

Оцінка важливості кожної складової компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв обчислювалась за формулою:

$$A_{km} = \sum_{i=1}^n w_i a_{ikm}$$

де:

n – кількість експертів (на кінець опитування $n = 36$);

i – номер експерта ($i = 1, \dots, n$);

k – номер компетентності з основ квантової інформатики ($k = 1, \dots, 8$);

m – номер складової k -тої компетентності з основ квантової інформатики;

A_{km} – оцінка важливості m -тої складової k -тої компетентності
($A_{km} = -1 * 4 * n \dots 3 * 4 * n$);

w_i – рівень компетентності i -того експерта у квантовій інформатиці ($w = 1, \dots, 4$);

a_{ikm} – оцінка важливості i -тим експертом m -тої складової k -тої компетентності.

Визначення найбільш важливих складових виконувалось наступним чином: якщо A_{km} не менше за порогове значення, відповідна складова відбиралась, інакше – не відбиралась.

Порогове значення $P = 120,8$ обчислене за формулою:

$$P = \min(A_{km}) + 0,45 * (\max(A_{km}) - \min(A_{km})),$$

де $\min(A_{km}) = 92$; $\max(A_{km}) = 156$.

Ураховуючи, що до оцінюваних складових були залучені як знання, так й уміння, у випадку, якщо для відібраного уміння не було відібрано відповідного знання, його відбір було виконано нами додатково. У таблицях 2.7– 2.14 рядки із відібраними складовими компетентності зафарбовані (напівжирне накреслення застосовано для складових, відібраних експертами).

У таблиці 2.7 наведено результати опитування та його опрацювання для першої компетентності – з фізичних основ квантових технологій.

У процесі оцінювання експерти мали можливість надати відповіді у вільній формі на запитання: «Які додаткові компетентності з фізичних основ квантових технологій, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?». Експерти запропонували наступне:

Таблиця 2.7

**Оцінювання важливості складових компетентності з фізичних основ
квантових технологій ($k = 1$)**

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання основних понять квантової фізики	1	2	1	13	19	139
2	знання динаміки кубітів	2	2	8	14	10	106
3	уміння визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах	1	4	5	14	12	115
4	уміння математично описувати стани та базиси Белла	2	4	3	17	10	107
5	уміння математично описувати надщільне кодування	1	4	7	15	9	100
6	уміння математично описувати квантову телепортацію	2	3	5	15	11	114
7	уміння подавати кубіт на сфері Блоха	2	4	7	16	7	92
8	уміння застосовувати засоби перетворення квантових алгоритмів на керуючі імпульси для квантових комп'ютерів	2	3	4	11	16	114
<i>Разом</i>							887

1) «критичне мислення; навички абстракції та узагальнення; базові знання з основ філософії»;

2) «розділ фізики "електрика та магнетизм" не повинен бути таким ущільненим»;

3) «інформаційно-цифрова компетентність передбачає впевнене, а водночас критичне застосування інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для створення, пошуку, обробки, обміну інформацією на роботі, в публічному просторі та приватному спілкуванні. Інформаційна й медіа-грамотність, основи програмування, алгоритмічне мислення, роботи з базами даних, навички безпеки в Інтернеті та кібербезпеці. Розуміння етики роботи з інформацією (авторське право, інтелектуальна власність тощо). В шкільному курсі треба обговорювати ідею використання принципів квантової механіки для виконання обчислень і про

те, що квантовий комп'ютер здатний розв'язувати певні задачі набагато швидше, ніж звичайні комп'ютери, наприклад, задачу факторизації цілих чисел або ефективного моделювання квантової системи багатьох тіл»;

4) «вивчення можливих фізичних реалізацій квантових комп'ютерів, їх застосувань у задачах прикладної квантової математики, криптографії, дослідженнях в галузі штучного інтелекту»;

5) «логічна компетентність, методологічна компетентність, математична»;

б) «мовна».

Друге та п'яте зауваження є ключовими у тому, що основи квантової інформатики мають вивчатися після опанування в курсі фізики розділу «Електрика та магнетизм», а математична компетентність має бути сформована на достатньому рівні. Вони підкреслюють, що основи квантової інформатики є пов'язаними з такими ключовими компетентностями, як компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій, що передбачають формування наукового світогляду, та математичної компетентності. Перше зауваження щодо розвитку критичного мислення та світогляду стосується вмінь, які, згідно Державних стандартів середньої освіти [141; 144], є наскрізними в усіх ключових компетентностях, а шосте – є ключовою компетентністю. Третє та четверте зауваження надали можливість уточнити зміст наступних компетентностей.

У таблиці 2.8 наведено результати опитування та його опрацювання для другої компетентності – з математичних основ квантової інформатики.

На питання «Які додаткові компетентності з математичних основ квантової інформатики, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?» експерти мали змогу надати відповідь у довільній формі. В одній з відповідей було зазначено, що «вищезазначених компетентностей буде достатньо», а також були названі такі додаткові складові:

1) «інтегральна компетентність – здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі в галузі розробки та впровадження новітніх інформаційних технологій, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, на основі знань, уміння, умінь та навичок розробки квантових алгоритмів, побудови

квантових обчислювальних схем»;

2) «здатність формулювати висновки та рекомендації, що впливають з проведеного математичного моделювання і обрахунків»;

3) «комунікативна»;

4) «практичне застосування»;

5) «математична логіка, обчислювальна алгебра».

Таблиця 2.8

Оцінювання важливості складових компетентності з математичних основ квантової інформатики ($k = 2$)

m	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання основ теорії комплексних чисел	2	3	3	0	28	144
2	знання основ лінійної алгебри	0	4	2	0	30	156
3	знання математичних основ квантової фізики	1	1	3	0	31	156
4	знання статистичної природи квантових вимірювань	1	4	1	0	30	148
5	уміння пояснювати поняття уявної одиниці та комплексного числа, зображати комплексні числа у комплексній площині, здійснювати перехід від алгебраїчної форми подання до тригонометричної	1	1	5	16	13	113
6	уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації	1	4	2	12	17	134
7	уміння оперувати із стандартними базисами	1	2	2	14	17	137
8	уміння подавати вектор у обраному базисі	1	3	2	16	14	128
9	уміння перетворювати базис подавати вектор у обраному базисі векторного простору	3	3	5	12	13	110
10	уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними	2	3	1	16	14	132
<i>Разом</i>							1358

Перше зауваження, на нашу думку, було б більш актуальним, якби пропоновані компетентності стосувалися вищої (а не середньої) освіти, адже «інтегральна компетентність розглядається як здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі в галузі» у стандартах вищої освіти [114].

Третє зауваження стосується ключових компетентностей, визначених у Державних стандартах загальної середньої освіти [141; 144]. Четверте зауваження було ураховано у восьмій компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв – практичні навички та загальні компетенції, до сфери яких, зокрема, віднесені й основи класичного (неквантового) програмування. У зв'язку з цим п'яте зауваження частково (стосовно математичної логіки) ураховане у восьмій компетентності, у той час як задачі обчислювальної алгебри (зокрема, знаходження власних значень та векторів) відносяться скоріше до першого рівня вищої освіти. Друге зауваження стосується здатності до набуття досвіду дослідження природи та формулювання доказових висновків на основі отриманої інформації, що є складовою компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій.

Таблиця 2.9 містить результати опитування та його опрацювання для третьої компетентності – із забезпечувальних технологій.

Оцінювання компетентності із забезпечувальних технологій передбачало необов'язкове питання: «Які додаткові компетентності із забезпечувальних технологій, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?». Відповіді надавалися у довільній формі й були такого змісту:

1) «спеціальні (фахові) компетентності: здатність розв'язання проблем, які необхідні для проведення досліджень та провадження інноваційної діяльності з метою розвитку нових знань та процедур в галузі новітніх інформаційних технологій, здатність працювати з англійськими джерелами»;

2) «оптимальні лабораторні, експериментальні технології»;

3) «квантова криптографія, квантова телепортація».

**Оцінювання важливості складових компетентності
із забезпечувальних технологій ($k = 3$)**

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюь відповіді	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання оптичних технологій	2	1	2	17	14	128
2	знання лабораторних технологій	2	1	3	15	15	126
3	знання експериментального управління	1	1	2	18	14	130
4	уміння розрізняти джерела фотонів	1	2	1	22	10	128
5	уміння описувати типову структуру джерел одиночних та заплутаних фотонів	1	2	3	22	8	116
<i>Разом</i>							628

Перша частина зауваження 1 урахована у змісті восьмої компетентності (практичні навички та загальні компетенції), а друга (здатність працювати з англійськими джерелами) стосується ключової компетентності – здатності спілкуватися іноземними мовами, цілеспрямоване формування якої відбувається у мовно-літературній освітній галузі [141].

Лабораторні технології та експериментальне управління визначені як складова компетентності із забезпечувальних технологій у Європейській рамці компетентностей у галузі квантових технологій. Водночас формування умінь, необхідних для використання лабораторних технологій «чистої кімнати», криогеніки, вакуумних технологій тощо передбачає необхідність доступу до відповідного обладнання.

Третє зауваження було ураховано при описі сьомої та першої компетентностей: квантову криптографію віднесено до квантової комунікації, а квантову телепортацію – до фізичних основ квантових технологій.

Таблиця 2.10 містить результати опитування та його опрацювання для четвертої компетентності – з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків.

Таблиця 2.10

**Оцінювання важливості складових компетентності з апаратного
забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків ($k = 4$)**

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання будови пристроїв на основі спіну (зокрема, напівпровідникових квантових точок)	2	1	4	21	8	111
2	знання про нейтральні атоми та йонні пастки	2	2	7	17	8	100
3	знання нових видів кубітів (зокрема, молекулярно-спінових кубітів)	2	1	7	18	8	97
4	знання обладнання для ініціалізації, маніпуляції та зчитування кубітів (мікрохвилі, лазери, резонатори, вимикачі, фазоперемикачі, затримувачі)	2	1	5	19	9	109
5	знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням	2	0	7	17	10	111
6	уміння описувати типові структури квантових комп'ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи	1	2	2	14	17	134
7	уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів	1	1	4	14	16	126
8	уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах	1	1	6	11	17	125
<i>Разом</i>							913

Поміж запропонованих компетентностей учасники опитування могли висловити свою думку у довільній формі, надавши відповідь на питання: «Які додаткові компетентності із апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?». Були отримані такі зауваження до компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків:

- 1) «квантовий комп'ютер може працювати швидше за класичний, він

також не здатний розв'язувати задачі, які не можна розв'язати на класичному комп'ютері за наявності достатньої кількості пам'яті та часу. Предметною компетентністю відповідно до державного стандарту можна обрати інтегральне поєднання наступних знань і умінь: знання і розуміння учнями основних фізичних теорій (зокрема квантової теорії), що характеризують рух та взаємодію, їх вплив на наукову картину світу, природу фундаментальних взаємодій, фізичну суть явищ природи, фізичні основи техніки, виробництва, сучасних технологій; умінь застосовувати методи наукового пізнання, фізичні поняття, моделі, величини, рівняння та закони»;

2) «уміти виправляти помилки в роботі програм»;

3) «дисциплінарні компетентності»;

4) «програмування»;

5) «більш розширені знання із апаратного забезпечення комп'ютерів»

Друге та четверте зауваження були ураховані у змісті п'ятої компетентності – компетентності з квантових обчислень та моделювання.

Таблиця 2.11 містить результати опитування та його опрацювання для п'ятої компетентності – з квантових обчислень та моделювання.

Таблиця 2.11

Оцінювання важливості складових компетентності з квантових обчислень та моделювання ($k = 5$)

М	Складова компетентності	Оцінка експерта					A _{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних)	3	3	7	13	10	105
2	знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних)	2	1	5	16	12	120
3	знання базових квантових алгоритми (Шора, Гровера, квантової оптимізації, оцінки квантової фази, квантової лінійної алгебри, квантового	2	2	4	15	13	119

М	Складова компетентності	Оцінка експерта					A _{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюся відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
	блукання та інших)						
4	знання про квантову корекцію помилок (фізичні механізми декогерентності, виправлення квантових похибок)	2	2	7	19	6	98
5	знання елементів квантового моделювання (зокрема, цифрових квантових симуляторів)	1	2	7	16	10	113
6	уміння записувати квантові вентиля за допомогою унітарних матриць	2	6	5	12	11	110
7	уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиля Адамара, фазові зсуви)	1	4	5	15	11	116
8	уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентиля Тоффолі та Фредкіна)	1	4	2	19	10	122
9	уміння застосовувати квантові вентиля для запису квантових алгоритмів	2	3	3	15	13	123
10	здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування	2	2	2	15	15	130
11	уміння реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.)	1	3	4	18	10	117
12	уміння використовувати бібліотеки квантових алгоритмів оптимізації, машинного навчання, квантового блукання, квантового перетворення Фур'є та ін.	2	3	3	18	10	116
13	уміння застосовувати засоби квантової корекції помилок	4	4	4	16	8	93
14	уміння працювати із квантовими симуляторами	2	4	2	17	11	117
<i>Разом</i>							1599

Поміж запропонованих складових компетентностей учасники опитування могли висловити свою думку у довільній формі, надавши відповідь на питання: «Які додаткові компетентності з квантових обчислень та моделювання, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової

інформатики?». У відповідях на це питання учасники опитування внесли наступні пропозиції:

1) «у основу навчально-пізнавальної діяльності покладено взаємодію між учнями, обговорення навчальних проблем. Організація навчального процесу в умовах використання комп'ютерно-орієнтованих засобів навчання повинна опиратися на сучасні дослідження психології та педагогіки в галузі подання та сприймання інформації, вікові особливості учнів»;

2) «логічна компетентність»;

3) «обчислення лінійних просторів».

Перше зауваження ураховано при розробці відповідної методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв. Третє зауваження частково ураховано у змісті другої компетентності (з математичних основ квантової інформатики). Щодо другого зауваження, то формування логічної компетентності відбувається насамперед у математичній освітній галузі, тому до складу компетентності з квантових обчислень та моделювання були включені знання та уміння, спільні для математичної логіки та схемотехніки – побудову квантових вентилів та схем.

Таблиця 2.12 містить результати опитування та його опрацювання для шостої компетентності – з квантових датчиків та метрології.

За зауваженнями респондентів компетентність з квантових датчиків та метрології слід уточнити наступними складовими:

1) «компетентність в підготовці та її відповідність актуальним проблемам сучасності»;

2) «експериментальна, спостерігаюча»;

3) «відомості про квантові датчики і їх роль в метрології».

Перше зауваження враховано у змісті восьмої компетентності (зокрема, застосування квантових технологій та їх економічний вплив, використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги). Третє зауваження ураховано в даній компетентності шляхом деталізації ключових метрологічних характеристик квантових датчиків. Друге зауваження стосується більше ключової компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій, тому

її конкретизацію було виконано у першій компетентності при розкритті основних понять квантової фізики.

Таблиця 2.12

Оцінювання важливості складових компетентності з квантових датчиків та метрології ($k = 6$)

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюь відповіді	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання будови атомних годинників	2	2	3	19	10	113
2	знання галузей застосування квантових датчиків	1	2	3	16	14	124
3	уміння описувати переваги та обмеження використання квантових датчиків (сенсорів) порівняно з іншими типами датчиків	1	2	4	15	14	118
4	уміння пояснювати особливості будови атомних годинників	1	2	6	12	15	106
5	уміння наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях	1	0	3	15	17	130
<i>Разом</i>							591

Таблиця 2.13 містить результати опитування та його опрацювання для сьомої компетентності – з квантової комунікації.

Учасники опитування надали наступні побажання:

1) «формування компетентностей, на мій погляд, вимагає зміщення акцентів із формування знань на набуття досвіду із застосування цих знань на практиці. Це не означає нівелювання знань у навчальному процесі, але відмова від формування знань заради їх накопичення. Отже, навчальні цілі слід співвіднести із особистими цілями учня, його вибором майбутньої професії, зрештою, врахувати його інтереси»;

2) «технологічна»;

3) «аналітична»;

4) «додаткові відомості про тунельний мікроскоп».

Таблиця 2.13

**Оцінювання важливості складових компетентності
з квантової комунікації ($k = 7$)**

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання квантової криптографії (квантового розподілу ключа, безпечної автентифікації, цифрових підписів, галузей застосування)	2	1	4	16	13	122
2	знання про квантові мережі (квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі)	1	0	4	13	18	133
3	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)	1	2	2	15	16	130
4	уміння демонструвати роботу протоколів BB84, E91	3	3	7	16	7	92
5	уміння описувати корекцію помилок із квантовим кульбітом	1	6	5	18	6	95
6	уміння послуговуватись квантовими генераторами випадкових чисел	1	3	6	13	13	114
7	уміння описувати принципи роботи та будову обладнання квантових мереж	1	3	2	16	14	129
8	уміння наводити приклади застосування квантової криптографії у різних галузях	1	2	4	13	16	125
<i>Разом</i>							940

Перше зауваження стосується не стільки даної компетентності, скільки запропонованої системи у цілому.

Друге зауваження знову стосується більше ключової компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій та її реалізації у технологічній освітній галузі. Щодо третього зауваження, то, на нашу думку, аналітична компетентність відноситься до вмінь, що є наскрізними в усіх ключових

компетентностях. Четверте зауваження було враховано у четвертій компетентності – зокрема, при описі проєкту твердотільного квантового комп’ютера на основі тунельного мікроскопу [3] – та частково у першій компетентності (з фізичних основ квантових технологій).

Таблиця 2.14 містить результати опитування та його опрацювання для восьмої компетентності – з практичних навичок та загальних компетенцій.

Таблиця 2.14

Оцінювання важливості складових практичних навичок та загальних компетенцій ($k = 8$)

<i>m</i>	Складова компетентності	Оцінка експерта					A_{1m}
		зовсім не важливо	мало важливо	утрудняюь відповіді	скоріше, важливо	дуже важливо	
1	знання основ класичного (неквантового) програмування: мов програмування, алгоритмів, класів складності, криптографії	2	2	2	13	17	133
2	знання галузей застосування квантових технологій	1	2	2	14	17	136
3	знання загальних навичок/компетенцій: навички управління та лідерства (огляд, потенціал та обмеження, економічний вплив квантових технологій, підприємництво, розробка та реалізація проєкту); комунікація з експертами в галузі; дослідницька етика та відповідальність, інноваційність; знання про інтелектуальну власність, стандартизацію, сертифікацію	1	2	4	16	13	118
4	уміння реалізувати базові класичні алгоритми (зокрема, криптографічні) мовами програмування	2	2	3	12	17	126
5	уміння наводити приклади використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги	2	4	2	13	15	124
6	уміння демонструвати навички управління та лідерства, мережевої взаємодії та спілкування з експертами	3	1	5	12	15	115
<i>Разом</i>							752

При оцінюванні даної компетентності респонденти зробили такі зауваження про додаткові практичні навички та загальні компетенції:

1) «структура компетентностей та їх функцій визначають систему методів і технологій, які покликані сформувати в учнів не відокремлені одне від одного знання й уміння, а здатності до використання їх у комплексі»;

2) «вміти презентувати свою (або колективну) роботу»;

3) «дослідницька, методологічна»;

4) «мовна»;

5) «володіння сучасними методами ефективного доступу до інформації, уміння здійснювати збір, обробку, аналіз науково-технічної інформації».

Перше зауваження стосується загальних рекомендацій зі створення системи компетентностей. Четверте зауваження стосується ключової компетентності. Всі інші пропозиції відносяться до складників дослідницької компетентності учнів.

Опрацювання результатів відповідей на питання «Оцініть за шкалою від 0 до 5 важливість навчання у ліцеї кожної з компетентностей» виявило, що усі компетентності є приблизно однаково важливими (їх внесок коливається від 12,17 % до 13,42 %), за винятком компетентності з квантових датчиків та метрології – її внесок становить 10,33 %. Це надає орієнтир для реалізації відібраного змісту навчання у навчальній програмі щодо розподілу навчального часу.

За результатами експертного опитування співвідношення кількості складників компетентності, що відносяться до знань, до складників-умінь виявилось співставним (20:19):

– перша компетентність – 1:3;

– друга компетентність – 4:4 (1:1);

– третя компетентність – 3:1;

– четверта компетентність – 1:3;

– п'ята компетентність – 3:3 (1:1);

– шоста компетентність – 1:1;

- сьома компетентність – 3:2;
- восьма компетентність – 3:2.

Аналіз результатів опитування надав можливість уточнити систему компетентностей з основ квантових технологій, визначену у п. 1.3, а також уточнити зміст навчання факультативного курсу «Основи квантової інформатики» для учнів ліцеїв (табл. 2.15).

Таблиця 2.15

**Уточнений зміст навчання факультативного курсу
«Основи квантової інформатики» для учнів ліцеїв**

№	Тема	Годин
1.	Квантова інформатика та перспективи її розвитку	1
2.	Арифметико-логічні основи роботи класичного комп'ютера (повторення)	1
3.	Кубіт. Квантовий логічний венти́ль Паулі Х.	1
4.	Квантові логічні вентиля́ Паулі Z, Y. Комплексні числа	1
5.	Квантові логічні вентиля́ Адамара та контрольованого заперечення. Розв'язання задач	1
6.	Алгоритм квантової телепортації. Реалізація алгоритму квантової телепортації за допомогою IBM Quantum Composer	1
7.	Основи програмування мовою Python (повторення)	1
8.	Програмування квантових алгоритмів. Реалізація алгоритму квантової телепортації за допомогою IBM Quantum Lab	1
9.	Квантові вентиля́ Тоффолі та Фредкіна	1
10.	Квантова комунікація. Квантова криптографія	1
11.	Алгоритм Бернштейна-Вазірані	1
12.	Алгоритм Дойча-Йожи	1
13.	Алгоритм Гровера	1
14.	Алгоритм Шора	1
15.	Бібліотеки квантових алгоритмів	1
16.	Елементи машинного навчання на квантових комп'ютерах	1
17.	Підсумкове заняття	1
	<i>Разом</i>	17

Компонентами *технологічного* блоку моделі є засоби та платформи навчання квантової інформатики, взаємопов'язані з методами навчання інформатики та формами організації навчальної діяльності учнів з інформатики. Спеціалізоване апаратно-програмне забезпечення квантової інформатики потребує виваженого та доцільного добору, що докладно представлені в п. 2.3.

Компоненти *результативного* блоку моделі репрезентують прогнозований результат застосування моделі, в даному випадку – відображають структурні

компоненти компетентностей з основ квантової інформатики, критерії та показники їх сформованості (п. 2.5).

2.3. Апаратно-програмні засоби навчання основ квантової інформатики

Використання вчителем різних видів апаратного та програмного забезпечення не обмежується навчальними програмами з інформатики [93; 120] за умови відповідності вимогам чинного законодавства [140; 142; 146; 150]. Також у програмах не зазначаються універсальні критерії добору програмного забезпечення, проте існують авторські системи критеріїв.

О. І. Яценко й О. С. Яценко поділяють критерії обрання програмного забезпечення на три групи:

1) критерії, пов'язані з можливостями мови програмування:

- підтримка запису математичних виразів в математичній формі;
- використовується модель обчислень (потік даних / потік керування);
- наявність підтримки алгоритмічних конструкцій;

2) критерії, пов'язані з можливістю використання середовища на початковому етапі вивчення мов програмування:

- простота, сучасність і візуальна привабливість інтерфейсу;
- наявність методичних посібників;
- україномовний інтерфейс;
- вартість (безкоштовна / платна);

3) критерії, пов'язані з технологічними аспектами середовища:

- кросплатформність;
- підтримка популярних робототехнічних конструкторів;
- ліцензія (пропріетарна чи відкрита);
- наявність підтримки та розвитку середовища [176, с. 107].

П. Г. Шевчук важливими характеристиками середовища програмування як засобу навчання вважає поширеність, доступність, особливості інтерфейсу, спосіб реалізації, системні вимоги, методичну підтримку, зручний та зрозумілий інтерфейс [174, с. 31].

В. М. Базурін зазначає, що на вибір середовища програмування для використання у процесі вивчення мови програмування впливають такі умови:

- технічні характеристики комп'ютерів і системні вимоги середовища програмування;
- наявність операційних систем і додаткового програмного забезпечення, необхідного для функціонування програмного середовища;
- функціонал програмного середовища;
- інтерфейс програмного середовища;
- наявність документації на програмне середовище;
- наявність навчально-методичного забезпечення;
- рівень компетентності вчителя інформатики [61, с. 15].

Т. А. Вакалюк окреслює такі характеристики, яким має відповідати хмаро орієнтоване середовище навчання: доступність та мобільність, відкритість, цілісність та безперервність, ефективність, систематичність, послідовність та структурованість, інноваційність, інтеграція з хмаро орієнтованими ресурсами, наочність, функціональність, колективність, забезпечення проектної діяльності, науковість, надійність, комунікаційність, гнучкість та адаптивність, індивідуалізація, наповненість, зручність, доцільність [72, с. 156].

А. В. Ворожбит виділяє такі критерії для використання веб-орієнтованих технологій для створення змісту навчання:

- вартість розроблення;
- гнучкість використання;
- зворотній зв'язок зі здобувачами освіти;
- зрозумілість подання навчального матеріалу;
- педагогічний контроль знань, мотивація до навчання,
- можливість використання мультимедійного динамічного контенту;
- навчальна діяльність здобувачів освіти;
- співпраця вчителя зі здобувачами освіти, здобувачів освіти між собою [76, с. 29].

При виборі хмаро орієнтованої платформи для опанування основ квантової

інформатики у закладах загальної середньої освіти нами були застосовані такі критерії:

- кросбраузерність;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс;
- можливість вільного (безоплатного) доступу;
- спрощена реєстрація;
- наявність систематизованої довідкової системи з прикладами;
- підтримка розвитку середовища розробником;
- підтримка роботи у персональному освітньому середовищі;
- підтримка роботи з квантовими алгоритмами у графічному режимі;
- автоматичне конвертування квантових алгоритмів з графічного формату

у текст програмного коду;

- підтримка україномовної локалізації;
- наявність мобільного застосунку;
- адаптивний дизайн.

Нами були проаналізовані можливості платформ для реалізації квантових алгоритмів від компаній Microsoft, QuTech, Amazon та IBM. Результати порівняння рішень наведені у табл. 2.16.

Компанія Microsoft через хмарну платформу для квантових обчислень Azure Quantum дозволяє відвідувачам навчитися використовувати комплект Quantum Development Kit для створення програм для квантового обладнання мовою Q# [32]. Microsoft власного квантового комп'ютера не має, а надає доступ до квантового обладнання Honeywell Quantum Solutions, IonQ, 1Qbit.

Нідерландська компанія QuTech надає безкоштовний доступ до навчальних матеріалів, до квантового симулятора, а до квантових чіпів на умовах реєстрації [16].

Інтернет-сервіс квантових обчислень Amazon Braket надає можливість доступу до квантового обладнання компаній D-Wave, IonQ, Rigetti [43].

Компанія IBM була першою, яка надала хмарний доступ до власного квантового обладнання у 2016 році [30], і наразі, на нашу думку, Quantum

Composer та Quantum Lab від IBM надають найбільші можливості безкоштовного використання квантових комп'ютерів та симуляторів [20].

Таблиця 2.16

Порівняння хмаро орієнтованих середовищ для реалізації квантових обчислень

Критерій	Microsoft	QuTech	Amazon Braket	IBM
кросбраузерність	+	+	+	+
інтуїтивно зрозумілий інтерфейс	+	+	+	+
спрощена реєстрація	– (ідентифікація за номером телефона або банківською картою)	+	– (ідентифікація за номером телефона, адресою)	+
можливість вільного (безоплатного) доступу	+	+	+	+
наявність систематизованої довідкової системи з прикладами	–	+	–	+
підтримка розвитку середовища розробником	+	+	+	+
підтримка роботи у персональному освітньому середовищі		+		+
підтримка роботи з квантовими алгоритмами у графічному режимі		–		+
автоматичне конвертування квантових алгоритмів з графічного формату у текст програмного коду		–		+
підтримка україномовної локалізації	–	–	–	–
наявність мобільного застосунку	–	–	–	–
адаптивний дизайн		+	+	–

Квантові симулятори IBM працюють на комп'ютерах класичної архітектури, дозволяють імітувати виконання квантових алгоритмів та обчислень. На час звернення до ресурсу квантових симуляторів IBM для дослідження були доступні симулятори від 32 до 5000 кубітів (таблиця 2.17). Квантові симулятори працюють швидше, тому спочатку слід перевірити свою квантову програму на симуляторі [21].

IBM надає відкритий (безкоштовний) доступ до квантових комп'ютерів із кількістю кубітів від 1 до 32 (табл. 2.18). Квантові комп'ютери IBM з більшою кількістю кубітів доступні для користувачів на додаткових умовах. Чим більший

обсяг «квантового об'єму», тим більшого розміру схему можна реалізувати на його кубітах.

Таблиця 2.17

Квантові симулятори

Назва квантового симулятора IBM	Кількість кубітів	Доступні квантові логічні вентиля
simulator_stabilizer	5000	ID, X, Y, Z, H, S, SDG, SX, SWAP, CX, CY, CZ, DELAY
simulator_mps	100	U1, U2, U3, U, P, CP, CX, CZ, ID, X, Y, Z, H, S, SDG, SX, T, TDG, SWAP, CCX, UNITARY, ROERROR, DELAY
simulator_extended_stabilizer	63	ID, X, Y, Z, H, S, SDG, SX, SWAP, CX, CZ, DELAY, P, CCX, U1, CCZ, T, TDG
simulator_statevector	32	U1, U2, U3, U, P, R, RX, RY, RZ, ID, X, Y, Z, H, S, SDG, SX, T, TDG, SWAP, CX, CY, CZ, CSX, CP, CU1, CU2, CU3, RXX, RYY, RZZ, RZX, CCX, CSWAP, MCX, MCY, MCZ, MCSX, MCP, MCU1, MCU2, MCU3, MCRX, MCRY, MCRZ, MCR, MCSWAP, UNITARY, DIAGONAL, MULTIPLEXER, INITIALIZE, KRAUS, ROERROR, DELAY
ibmq_qasm_simulator	32	U1, U2, U3, U, P, R, RX, RY, RZ, ID, X, Y, Z, H, S, SDG, SX, T, TDG, SWAP, CX, CY, CZ, CSX, CP, CU1, CU2, CU3, RXX, RYY, RZZ, RZX, CCX, CSWAP, MCX, MCY, MCZ, MCSX, MCP, MCU1, MCU2, MCU3, MCRX, MCRY, MCRZ, MCR, MCSWAP, UNITARY, DIAGONAL, MULTIPLEXER, INITIALIZE, KRAUS, ROERROR, DELAY

IBM Quantum надає можливість створювати квантові схеми в IBM Quantum Composer та писати програми для квантових комп'ютерів мовами QASM та Python в IBM Quantum Lab.

Як найпростіший інструмент для створення, графічної візуалізації та запуску квантових схем на квантових симуляторах і на реальних квантових комп'ютерах IBM пропонує набір інструментів (сервіс) IBM Quantum Composer (рис. 2.3).

На рис. 2.3 показано:

1 – бічна панель надає доступ до власних файлів, завдань або документації. Відкрити або закрити бічну панель можна натисканням піктограми на вкладці;

2 – рядок меню використовується для створення нової схеми, керування та збереження схем, налаштування робочої області, отримання допомоги тощо;

3 – область входу в обліковий запис та налаштування параметрів для запуску квантової схеми;

4 – квантові вентиля (гейти) та панель операцій – це будівельні блоки квантових схем. Різні типи вентилів згруповані за кольором: класичні вентиля (гейти) мають темно-синій колір, фазові вентиля (гейти) – світло-блакитний, а неунітарні операції – сірий. Кнопка \vdots (з трьома крапками) дозволяє відкрити довідник квантових операцій та гейтів, отримати допомогу з використання гарячих клавіш, згорнути панель квантових операцій до одного рядка, зберегти створену квантову схему як файл у різних форматах (pdf, svg, png);

Таблиця 2.18

Квантові комп'ютери ІВМ (за [21], станом на 01.04.2021)

Назва квантового комп'ютера ІВМ	Кількість кубітів	«Квантовий об'єм»	Доступні квантові логічні вентиля	Вільний доступ
ibmq_16_melbourne	15	8	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_5_yorktown	5	8	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_armonk	1	1	ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_athens	5	32	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_belem	5	16	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_bogota	5	32	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_brooklyn	65	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_cairo	27	64	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_casablanca	7	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_dublin	27	64	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_guadalupe	16	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_hanoi	27	64	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_jakarta	7	16	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_kolkata	27	128	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_lagos	7	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_lima	5	8	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_manhattan	65	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_manila	5	32	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_montreal	27	128	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_mumbai	27	128	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_nairobi	7	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_paris	27	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_peekskill	27	–	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_quito	5	16	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_rome	5	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_santiago	5	32	CX, ID, RZ, SX, X	Так
ibmq_sydney	27	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні
ibmq_toronto	27	32	CX, ID, RZ, SX, X	Ні

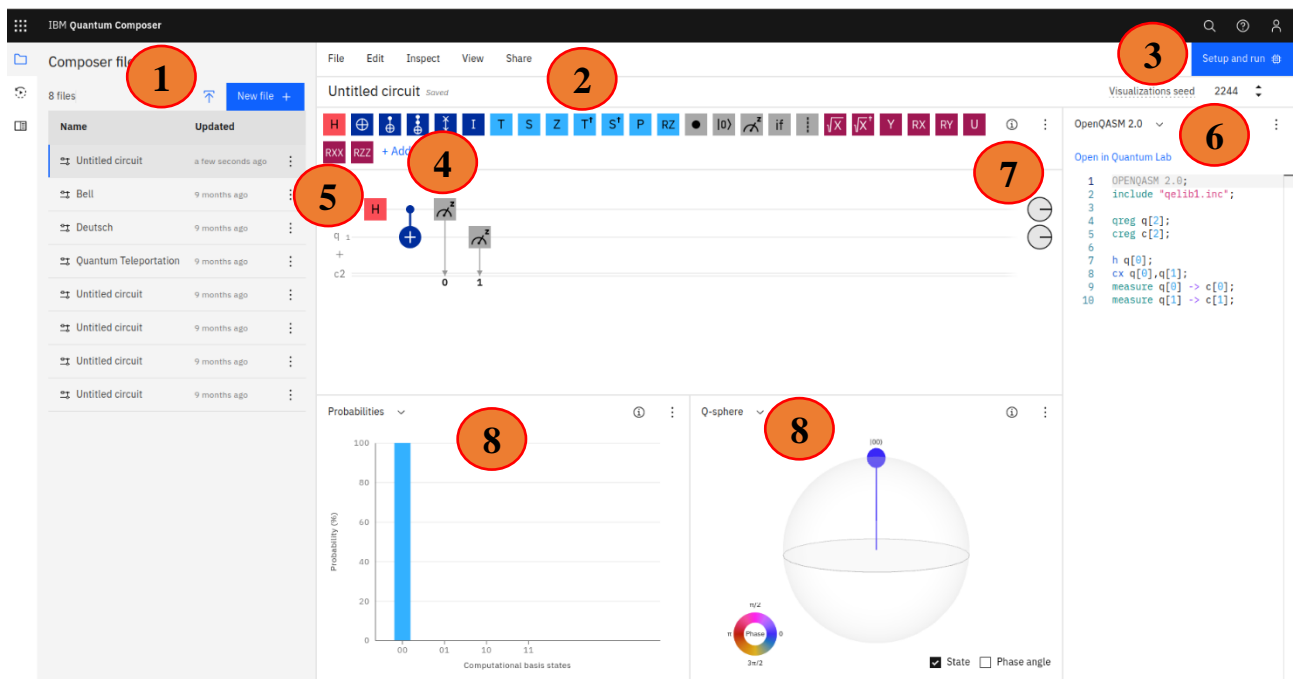


Рис. 2.3. Інтерфейс IBM Quantum Composer

5 – графічний редактор квантових схем. Додавання операцій, які треба виконати над кубітами, здійснюється простим перетягуванням вентиля на редактор графічних квантових схем;

6 – редактор коду дає змогу переглядати та копіювати автоматично згенерований на основі побудованої схеми код OpenQASM або Qiskit для використання в інших програмах;

7 – фазові диски відображають фазу вектора стану кубіту на комплексній площині, що задається радіальною лінією, яка обертається проти годинникової стрілки;

8 – візуалізації стану кубітів, що моделюють створювану схему у процесі побудови.

Елементи, подані у таблиці 2.19:

- вентиль Н, або вентиль Адамара, необхідний для переведення кубіту в стан суперпозиції;
- вентиль Паулі Х еквівалентний бітовому запереченню;
- вентиль CNOT, також відомий як вентиль контрольованого заперечення (CX), діє на пару кубітів, один з яких діє як контрольний, а інший як цільовий.

Він виконує заперечення на цільовому кубіті кожного разу, коли елемент управління знаходиться в стані дозволу. Якщо контрольний кубіт знаходиться в суперпозиції, цей вентиль створює сплутування;







- вентиль Z змінює знак кубіту;
- вимірювання кубітів – необоротна операція, що змінює стан кубіту.

Результатом вимірювання є традиційний біт;

- розмежовувач (бар'єр) корисний для візуалізації квантових схем.

Таблиця 2.19

Деякі позначення, що застосовуються у IBM Quantum Composer

Елемент схеми	Позначення в IBM Quantum Composer	Приклад використання в IBM Quantum Lab	Матричне подання
Вентиль H		<code>circuit.h(qreg)</code>	$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
Вентиль X		<code>circuit.x(qreg)</code>	$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
Вентиль CNOT (CX)		<code>circuit.cx(qreg)</code>	$CX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Вентиль Z		<code>circuit.z(qreg)</code>	$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
Вимірювач		<code>circuit.measure(qreg, creg)</code>	
Розмежовувач		<code>circuit.barrier()</code>	

IBM Quantum Composer дозволяє візуалізувати схему квантових операцій та результат у вигляді ймовірностей (probabilities), вектору стану на виході (statevector), графічно на Q-сфері, а також переглянути опис створеної схеми на квантовому асемблері QASM 2.0 або Qiskit з можливістю відкрити код у IBM Quantum Lab. Перегляд створеної схеми в режимі інспектування (Inspect) дає можливість одночасного покрокового перегляду стану змін кубітів як на графічній схемі, так й у вікні квантового асемблера QASM. IBM Quantum Composer дозволяє обрати хмарний квантовий пристрій, на якому буде відбуватися обчислення за побудованою квантовою схемою, що читається зліва направо.

Робота з IBM Quantum Composer за умови доступу без реєстрації передбачає використання лише симулятора.

Для використання більшого функціоналу від IBM Quantum Composer (мати можливість обрати симулятор, запустити схему на реальному квантовому обладнанні) необхідно авторизуватися одним із способів: а) за вхідними даними наявного облікового запису Google (або GitHub, Twitter, LinkedIn, Fraunhofer); 2) за електронною поштою; 3) за обліковим записом IBM (зокрема, для доступу до пробних версій, демонстраційних програм, стартових наборів, послуг та API. Організаціям у рамках IBM Quantum Network можна отримати доступ до найновіших систем квантових обчислень й інструментів розробки після подання електронної заявки та її розгляду [5]).

Набір інструментів (сервіс) для реалізації квантових алгоритмів мовою програмування, побудови та візуалізації квантових схем у текстовому режимі – IBM Quantum Lab – доступний у будь-якому стандартному браузері виключно за умови авторизації. У IBM Quantum Lab можна створити нову програму для квантового обладнання або відкрити схему, що раніше була побудована в IBM Quantum Composer, через редактор коду. Інтерфейс IBM Quantum Lab буде знайомим тим користувачам, хто має досвід роботи з Notebook Python або Jupyter Notebook (рис. 2.4).

Запуск рядка з командами відбувається звичними для Jupyter Notebook способами: кнопкою Run або комбінацією клавіш Shift+Enter. При побудові програми для квантового обладнання треба вказати необхідну кількість кубітів та класичних бітів (за замовчуванням кожний кубіт встановлюється у нульовий початковий стан). Потім слід додати вентиля для маніпулювання кубітами та вивести результат або додати спосіб візуалізації побудованої квантової схеми.

Для ґрунтовного розуміння основних теоретичних засад квантових обчислень та набуття первинних практичних умінь управління квантовим комп'ютером через побудову та реалізацію квантових алгоритмів на схемах та універсальною мовою програмування Python, IBM пропонує локальну та/або віддалену роботу з інструментарієм SDK Qiskit [20; 38].

Беручи до уваги результати порівняльного аналізу за означеною системою критеріїв (табл. 2.16) було визначено, що для навчання основ квантової

інформатики учнів ліцеїв найбільш доцільним є використання хмаро орієнтованої платформи IBM Quantum [20], насамперед через те, що дана платформа надає безкоштовний доступ до квантових симуляторів та комп'ютерів, постійно вдосконалюється розробником, надає можливість розв'язувати задачі квантової інформатики графічно з синхронним перетворенням на програмний код мовою квантового асемблера або мовою Python.

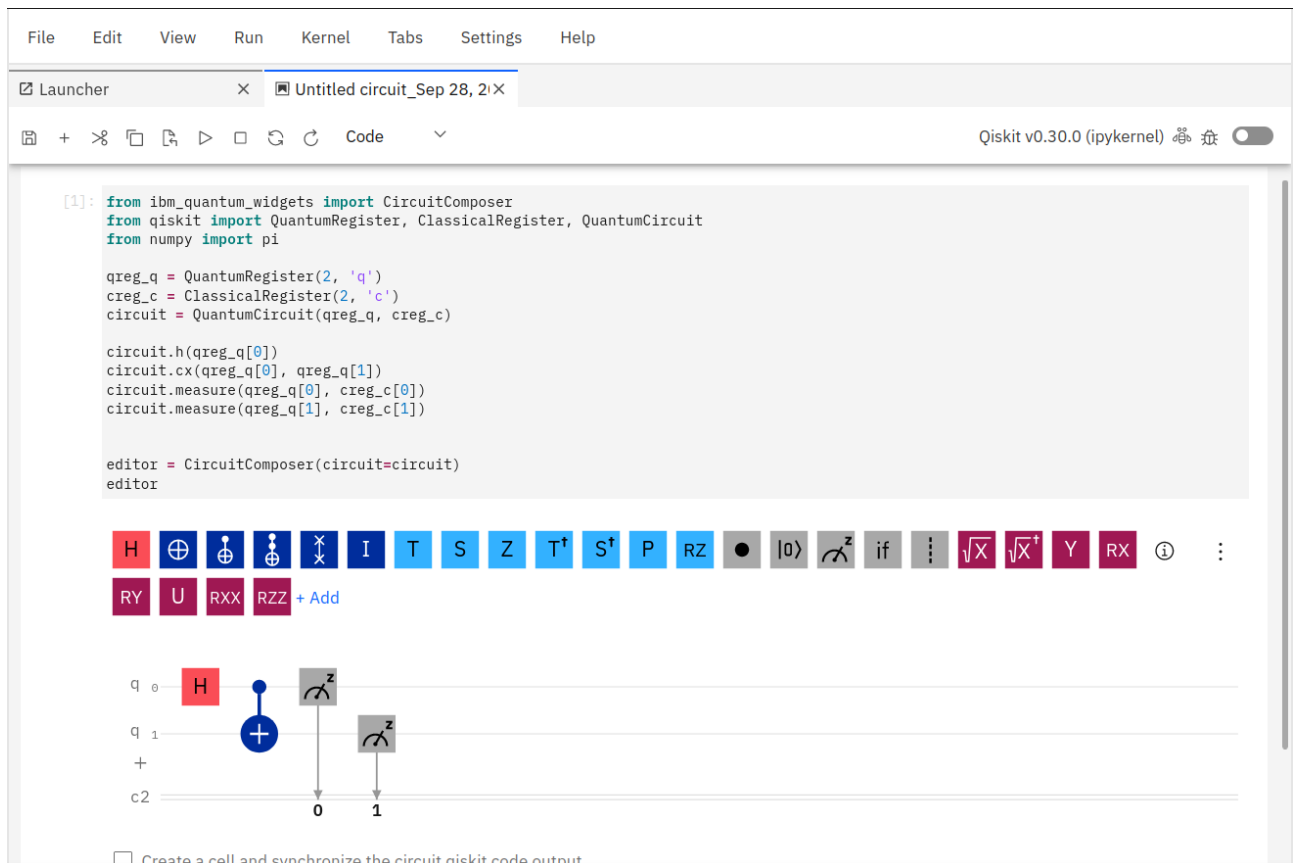


Рис. 2.4. Інтерфейс IBM Quantum Lab

Наразі відсутність української локалізації інтерфейсу IBM Quantum не є суттєвою проблемою для здобувачів освіти у 10-11 класах. Адже, з одного боку, за такої організації навчання природним є розвиток їх ключової багатомовної компетентності. Через стрімкий розвиток платформи IBM Quantum можна сподіватися на появу адаптивного дизайну та мобільного застосунку.

2.4. Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Вивчення інформатики як шкільного предмету має значущу роль у

формуванні багатьох видів діяльності, що мають міжпредметний характер, надає можливість зрозуміти процеси й явища у природничих науках, у соціології, економіці тощо.

Авторська програма факультативного курсу з основ квантової інформатики пропонується для учнів ліцеїв (учнів 10-11(12) класів закладів загальної середньої освіти), які обрали математичний, фізичний, фізико-математичний або інформаційно-технологічний профілі навчання. Передусім курс орієнтований на засвоєння фундаментальних знань та набуття відповідних до них умінь у галузі квантових технологій. Наявність знань з основ квантової фізики та лінійної алгебри є бажаною, однак – не обов'язковою. Програма курсу передбачає отримання учнями всіх необхідних базових відомостей з основ квантової інформатики.

Курс розрахований на 17 навчальних годин (Додаток Л) і включає в себе 3 змістові лінії:

- фізичні та математичні основи квантової інформатики (ЗЛ.ОКІ.01);
- квантові обчислення, алгоритмізація та програмування (ЗЛ.ОКІ.02);
- квантові телекомунікаційні технології (ЗЛ.ОКІ.03).

Вивчення цих змістових ліній має сформувати в учнів знання, необхідні для застосування квантових технологій у подальшому навчанні та професійній діяльності.

Тематичне планування факультативного курсу «Основи квантової інформатики» із переліком очікуваних результатів його опанування як складових компетентностей, що формуються/розвиваються, подано у табл. 2.20.

Таблиця 2.20

**Тематичне планування факультативного курсу
«Основи квантової інформатики»**

№	Тема	Очікувані результати навчання
1.	Квантова інформатика та перспективи її розвитку	<p>Фізичні основи квантових технологій:</p> <p>- знання основних понять квантової фізики.</p> <p>Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків:</p> <p>- знання будови пристроїв на основі спіну (зокрема, напівпровідникових квантових точок);</p> <p>- уміння описувати типові структури квантових комп'ютерів,</p>

№	Тема	Очікувані результати навчання
		<p>пояснювати загальні принципи їх роботи.</p> <p>Квантові датчики та метрологія:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання галузей застосування квантових датчиків; - уміння наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях. <p>Практичні навички та загальні компетенції:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання галузей застосування квантових технологій.
2.	Арифметико-логічні основи роботи класичного комп'ютера (повторення)	<p>Математичні основи квантової інформатики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання основ лінійної алгебри; - уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними; - уміння оперувати із стандартними базисами; - уміння подавати вектор у обраному базисі.
3.	Кубіт. Квантовий логічний вентиль Паулі X.	<p>Фізичні основи квантових технологій:</p> <ul style="list-style-type: none"> - уміння подавати кубіт на сфері Блоха. <p>Математичні основи квантової інформатики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання основ лінійної алгебри; - уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації; - уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними; - уміння оперувати із стандартними базисами; - уміння подавати вектор у обраному базисі; - знання математичних основ квантової фізики; - знання статистичної природи квантових вимірювань. <p>Квантові обчислення та моделювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних); - уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі).
4.	Квантові логічні вентиля Паулі Z, Y. Комплексні числа	<p>Фізичні основи квантових технологій:</p> <ul style="list-style-type: none"> - уміння подавати кубіт на сфері Блоха. <p>Математичні основи квантової інформатики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання основ теорії комплексних чисел; - знання основ лінійної алгебри; - уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації; - уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними. <p>Квантові обчислення та моделювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних); - уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі).
5.	Квантові логічні вентиля Адамара та контрольованого заперечення. Розв'язання задач	<p>Квантові обчислення та моделювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних); - уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви); - уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів.
6.	Алгоритм квантової телепортації. Реалізація алгоритму квантової	<p>Фізичні основи квантових технологій:</p> <ul style="list-style-type: none"> - уміння математично описувати квантову телепортацію. <p>Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів і датчиків:</p> <ul style="list-style-type: none"> - знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх

№	Тема	Очікувані результати навчання
	телепортації за допомогою графічного середовища	інтеграції з класичним обладнанням; - уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів; - уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах.
7.	Основи програмування	Практичні навички та загальні компетенції: - 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.
8.	Програмування квантових алгоритмів. Реалізація алгоритму квантової телепортації у середовищі програмування	Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів і датчиків: - знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням; - уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів; - уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах. Квантові обчислення та моделювання: - знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних).
9.	Квантові вентиля Гоффоли та Фредкіна	Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів і датчиків: - знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням; - уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів; - уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах. Квантові обчислення та моделювання: - знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних); - уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентиля Гоффоли та Фредкіна)
10.	Квантова комунікація. Квантова криптографія	Квантова комунікація: - знання квантової криптографії (квантового розподілу ключа, безпечної автентифікації, цифрових підписів, галузей застосування); - знання про квантові мережі (квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі); - 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. Забезпечувальні технології: - знання оптичних технологій; - знання лабораторних технологій; - знання експериментального управління; - уміння розрізняти джерела фотонів.
11.	Алгоритм Бернштейна-Вазірані	Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів і датчиків: - знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх
12.	Алгоритм Дойча	інтеграції з класичним обладнанням;

№	Тема	Очікувані результати навчання
	Йожи	- уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів;
13.	Алгоритм Гровера	- уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах.
14.	Алгоритм Шора	Квантові обчислення та моделювання:
15.	Бібліотеки квантових алгоритмів	- знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних); знання базових квантових алгоритмів; - уміння застосовувати квантові вентиля для запису квантових алгоритмів; - здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування.
16.	Прикладне застосування квантових технологій	Квантові обчислення та моделювання: - знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних); знання базових квантових алгоритмів; - уміння застосовувати квантові вентиля для запису квантових алгоритмів; - здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування.
17.	Підсумкове заняття	

2.4.1. Методика навчання змістової лінії «Фізичні та математичні основи квантової інформатики»

У межах змістової лінії «Фізичні та математичні основи квантової інформатики» формуються (розвиваються) компетентності, що належать до перших двох груп системи, поданої у п. 1.3 та уточненої у п. 2.2, а саме: знання основних понять квантової фізики, уміння визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах, уміння подавати кубіт на сфері Блоха, 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 бракет нотації, уміння оперувати із стандартними базисами, уміння подавати вектор у обраному базисі, уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними.

Змістова лінія «Фізичні та математичні основи квантової інформатики» розкриває фундаментальні фізичні і математичні аспекти функціонування квантового обладнання, показує фізичну реалізацію явищ мікросвіту, описаних математично.

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

Для опису квантових станів мікрочастинок (кубітів) використовується спеціальна система позначень – *бра-кет нотація* (від англ. *bracket* – дужка), запропонована Полем Діраком – бра-вектор $\langle a|$, кет-вектор $|b\rangle$. Якщо вектор записано горизонтально, то – це вектор-рядок або бра-вектор. Наприклад, $(0 \ 1)$ – двовимірний бра-вектор, $(0 \ 1 \ 0)$ – тривимірний бра-вектор. Якщо вектор записано вертикально, то – це вектор-стовпець або кет-вектор.

Наприклад, $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ – двовимірний кет-вектор, $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ – тривимірний кет-вектор.

Базові стани кубіта – це одиничні кет-вектори $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ та $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

У таких векторах сума квадратів його елементів дорівнює нулю.

Будь-який двовимірний вектор $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ може представляти стан кубіта, при чому α і β можуть бути довільними дійсними або комплексними числами, що задовольняють певній умові.

У ході пояснення учні повинні усвідомити, що всі стани кубіта являють собою лінійну комбінацію (суперпозицію) його базових станів та подаються формулою:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

де α і β – довільні числа, для яких виконується співвідношення $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

На даному етапі виникає очевидна потреба ознайомлення учнів із ключовими поняттями теорії комплексних чисел – поняття уявної одиниці, комплексного числа, алгебраїчної форми запису комплексного числа, геометричного змісту комплексного числа.

Формування системи знань з основ теорії комплексних чисел доцільно розпочати з розповіді про прикладне значення комплексних чисел, їх роллю не тільки у квантових обчисленнях, а й у розрахунках з теорії пружності, електротехніці, аеродинаміці, зв'язку, конструюванні ракет та літаків, кресленні географічних карт, у дослідженні течії води тощо.

Поняття уявної одиниці пропонується ввести на прикладі проблеми розв'язання квадратного рівняння виду:

$$x^2 + 1 = 0$$

$$x^2 = -1$$

$$x = \pm\sqrt{-1}$$

Слід акцентувати увагу учнів (нагадати учням), що арифметичний квадратний корінь визначений на множині невід'ємних дійсних чисел (більших або рівних 0), т.б. добування арифметичного квадратного кореня з від'ємного числа не має змісту, а отже, оперуючи виключно дійсними числами, розв'язати дане рівняння неможливо; подібні задачі можуть бути розв'язані лише за рахунок розширення множини дійсних чисел \mathbb{R} до множини комплексних чисел \mathbb{C} . У математиці $\sqrt{-1}$ позначають числом i , яке називають уявною одиницею, що задовольняє рівність $i^2 = -1$ або $i = \sqrt{-1}$.

Для закріплення поняття уявної одиниці та введення поняття комплексне число доцільно буде навести приклади розв'язання рівнянь, дискримінант у яких є від'ємним числом, а саме:

$$x^2 - 4x + 8 = 0$$

$$D = 16 - 32 = -16$$

$$x_{1,2} = \frac{4 \pm \sqrt{-16}}{2} = \frac{4 \pm \sqrt{16 \cdot (-1)}}{2} = \frac{4 \pm 4\sqrt{-1}}{2} = 2 \pm 2i$$

Розв'язком даного рівняння є пара комплексно спряжених чисел $2 \pm 2i$ (у чому учні можуть переконатися здійснивши розв'язання даного рівняння за допомогою певної універсальної системи комп'ютерної математики). Узагальнюючи отримані результати учні мають дійти висновку, що будь-яке комплексне число z в алгебраїчній формі подається у вигляді:

$$z = a + bi,$$

де

a – дійсна частина комплексного числа;

b – уявна частина комплексного числа;

i – уявна одиниця, для якої справедливою є рівність $i^2 = -1$.

Не буде зайвим зазначити, що комплексні числа виду $z = bi$, в яких дійсна частина $a = 0$, називають чисто уявними.

Для візуалізації кубіту важливим є розуміння геометричного змісту комплексного числа. Якщо комплексне число $z = a + bi$ задається впорядкованою парою дійсних чисел (a, b) , то цю пару можна розглядати як радіус-вектор з координатами (a, b) на площині (рис. 2.5).

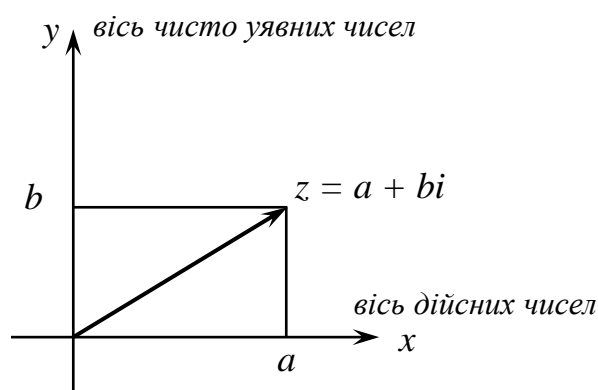


Рис. 2.5. Ілюстрація геометричного змісту комплексного числа

Після розуміння учнями квантового стану, базисних векторів $|0\rangle$ та $|1\rangle$,

властивостей хвильової функції описувати стани будь-якої мікрочастинки, застосування комплексних чисел у записі хвильової функції, геометричного представлення комплексних чисел, учням слід демонструвати кубіт на сфері Блоха (рис. 2.6).

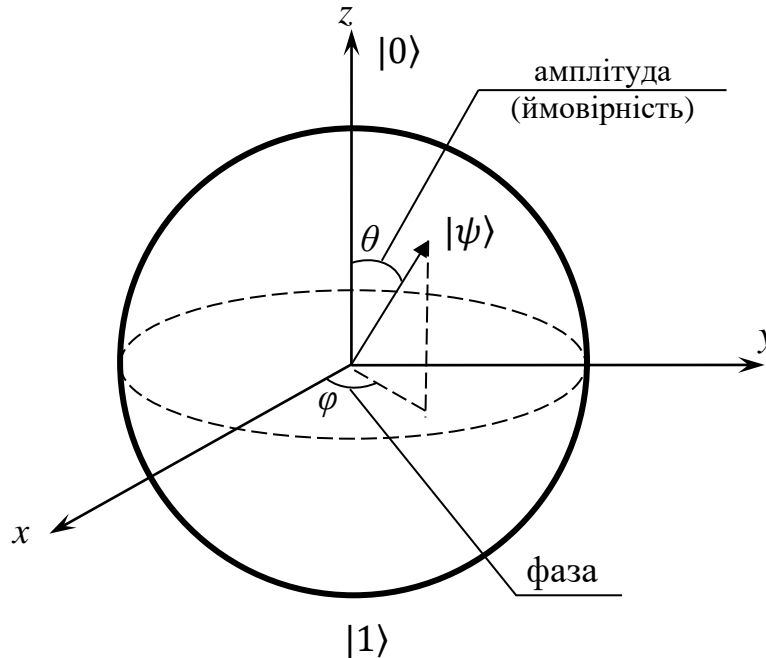


Рис. 2.6. Сфера Блоха

При формуванні компетентності подавати кубіт на сфері Блоха слід зауважити, що для побудови стану кубіта на сфері Блоха використовуються координатні кути: φ – полярний кут (зенітний кут або широта, нахил) – фаза, а θ – азимутальний кут – амплітуда.

Важливим буде звернути увагу учнів на зв'язок сферичної й декартової систем координат:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, \\ z = r \cos \theta. \end{cases}$$

де r – довжина вектора $|\psi\rangle$, що при квантових обчисленнях приймається рівною 1.

Далі слід пояснити, що при зафіксованому (сталому) радіусі при зміні кутів буде отримана сфера в тривимірному просторі. Оскільки кути визначені так

само, як і для хвильової функції двовимірної системи, то на сфері будуть відображені всі можливі стани кубіта (як точки на сфері фіксованого радіуса r). Таке подання тривимірної системи називається сферою Блоха, на честь Нобелівського лауреата з фізики Фелікса Блоха.

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 напрямленого відрізка. Вектор-стовпець, що представляє стан кубіта, являє собою певну таблицю чисел з одного стовпця і двох рядків. Далі доцільно навести пояснення, що стовців і рядків з числами може бути декілька. Така таблиця чисел, розташованих у рядки і стовпці, є матрицею. Кількість рядків і стовпців 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:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot 1 &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 1 \\ 1 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot 0 &= \begin{pmatrix} 1 \cdot 0 \\ 0 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot 1 &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 1 & 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 1 & 0 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot 0 &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 & 1 \cdot 0 \\ 1 \cdot 0 & 0 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

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 стовпців першої матриці та рядків другої матриці співпадають. Результатом множення буде матриця розмірності, що дорівнює кількості рядків першої матриці та кількості стовпців другої матриці. Елементи результуючої матриці знаходяться як сума попарних добутків елементів рядка першої матриці на елементи відповідного стовпця другої матриці. За потреби можна навести уточнення – щоб помножити матрицю на вектор, слід кожний рядок матриці поелементно множити на значення вектору:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot x + b \cdot y \\ c \cdot x + d \cdot y \end{pmatrix}.$$

У випадку матриці з трьох (або більше) рядків і стовпців техніка множення аналогічна:

$$\begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z \\ d \cdot x + e \cdot y + f \cdot z \\ g \cdot x + h \cdot y + i \cdot z \end{pmatrix}.$$

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 позначається \otimes та 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:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_0 & \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} \\ x_1 & \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 y_0 \\ x_0 y_1 \\ x_1 y_0 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} \\ 2 & \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 3 \\ 1 \cdot 4 \\ 2 \cdot 3 \\ 2 \cdot 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} c \\ d \\ e \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a & \begin{pmatrix} c \\ d \\ e \end{pmatrix} \\ b & \begin{pmatrix} c \\ d \\ e \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ac \\ ad \\ ae \\ bc \\ bd \\ be \end{pmatrix} \end{aligned}$$

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:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 y_0 z_0 \\ x_0 y_0 z_1 \\ x_0 y_1 z_0 \\ x_0 y_1 z_1 \\ x_1 y_0 z_0 \\ x_1 y_0 z_1 \\ x_1 y_1 z_0 \\ x_1 y_1 z_1 \end{pmatrix}.$$

Наступним наводиться приклад тензорного множення матриць:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} & 0 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \\ 0 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} & 1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) & 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \\ 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) & 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

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.

Уміння оперувати стандартними базисами та уміння подавати вектор у базовому стані повинні ґрунтуватися на розумінні, що векторам $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ та $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ притаманне особливе значення, бо вони утворюють базис векторного простору, що описує стан кубіту. Учні повинні трактувати це так, що будь-який вектор квантового стану може бути записаний у вигляді лінійної комбінації цих базисних векторів. Зокрема, вектор $|x\rangle = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}$ можна записати так: $|x\rangle = x_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Будь-яке обертання цих векторів може слугувати допустимим базисом для кубіта, проте обраний саме цей і він називається

обчислювальним базисом або стандартним базисом.

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.

Приклад (з виключно дійсночисельними елементами вихідної матриці).

Показати, що матриця $A = \begin{pmatrix} \sin x & -\cos x \\ \cos x & \sin x \end{pmatrix}$ – унітарна.

Розв'язання:

1) Для вихідної матриці $A = \begin{pmatrix} \sin x & -\cos x \\ \cos x & \sin x \end{pmatrix}$ знайдемо ермітово спряжену матрицю A^+ . У даному випадку вона буде знайдена звичайним транспонуванням:

$$A^+ = \begin{pmatrix} \sin x & \cos x \\ -\cos x & \sin x \end{pmatrix}.$$

2) Виконаємо множення знайденої ермітово спряженої матриці A^+ на вихідну матрицю A :

$$\begin{aligned} A^+ \cdot A &= \begin{pmatrix} \sin x & \cos x \\ -\cos x & \sin x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin x & -\cos x \\ \cos x & \sin x \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \sin^2 x + \cos^2 x & -\sin x \cos x + \cos x \sin x \\ -\cos x \sin x + \sin x \cos x & \sin^2 x + \cos^2 x \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = E. \end{aligned}$$

Приклад (з вихідною матрицею, елементами якої є комплексні числа).

Показати, що матриця $A = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ – унітарна.

1) Для вихідної матриці $A = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ знайдемо ермітово спряжену матрицю A^+ . Так як вихідна матриця A містить комплексні елементи, то для знаходженням A^+ треба A транспонувати (знайти A^T) й замінити кожен комплексний елемент на комплексно спряжений:

$$A^T = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix} \text{ – транспонування;}$$

$A^+ = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ – заміна в A^T комплексних елементів на комплексно-спряжені. У нашому прикладі $A^+ = A$.

2) Виконаємо множення знайденої ермітово спряженої матриці A^+ на вихідну матрицю A :

$$\begin{aligned} A^+ \cdot A &= \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 + (-i) \cdot i & 0 \cdot (-i) + (-i) \cdot 0 \\ i \cdot 0 + 0 \cdot i & i \cdot (-i) + 0 \cdot 0 \end{pmatrix} = \end{aligned}$$

(так як $i = \sqrt{-1}$)

$$\begin{aligned} &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 + (-\sqrt{-1}) \cdot \sqrt{-1} & 0 + 0 \\ 0 + 0 & \sqrt{-1} \cdot (-\sqrt{-1}) + 0 \cdot 0 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = E \end{aligned}$$

Для самостійного виконання учням пропонуються завдання для перевірки чи є матриці унітарними, наприклад: $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$, $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1-i & 1+i \\ 1+i & 1-i \end{pmatrix}$.

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 (Додаток Г).

2.4.2. Методика навчання змістової лінії «Квантові обчислення, алгоритмізація та програмування»

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).

Для ґрунтовного засвоєння арифметико-логічних основ роботи квантового комп'ютера необхідним є організація повторення основних принципів роботи логічних елементів класичних комп'ютерів, для чого пропонуємо використання онлайн-сервісу <https://logic.ly/demo/>.


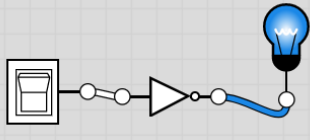

Логічне заперечення (інверсія) – це унарна логічна операція (функція) приєднання частинки «не» до висловлювання. Інвертор – схема, що реалізує логічну функцію заперечення НЕ (NOT) або інверсії вхідного сигналу.

Позначення інверсії може бути таким: НЕ A , \bar{A} , $\neg A$, A' , NOT A .

Якщо на вході такої схеми 0, то на виході 1, і навпаки, якщо на вході 1, то на виході 0. Приклад застосування логічної операції НЕ засобами онлайн-сервісу logic.ly наведено у таблиці 2.21.

Таблиця 2.21

**Інструкційна картка застосування класичного логічного елемента НЕ
(засобами онлайн-сервісу logic.ly)**

Дія	Очікуваний результат
Під'єднаємо перемикач напряму до лампочки	
Під'єднаємо перемикач через вентиль НЕ до лампочки: перемикач вимкнено	
перемикач увімкнено	

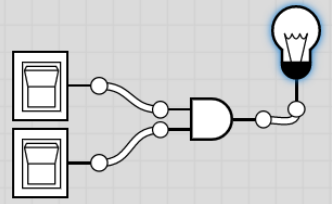
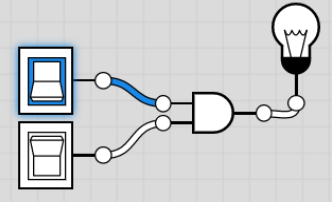
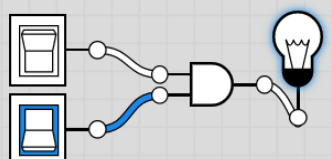
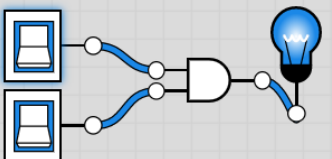
Кон'юнкція (логічне множення) утворюється з'єднанням двох висловлювань в одне за допомогою частки I (AND).

Кон'юнкція може позначатися: A і B , $A \cdot B$, $A * B$, $A \wedge B$, $A \cap B$, A and B .

На виході такої схеми буде 1 тоді і тільки тоді, коли на обох входах буде 1. Якщо входів більше двох, на виході буде 1, коли на всіх входах 1. Приклад застосування логічної операції I засобами онлайн-сервісу logic.ly наведено у таблиці 2.22.

Диз'юнкція (логічне додавання) утворюється з'єднанням двох висловлювань в одне за допомогою частки АБО (OR).

**Інструкційна картка застосування класичного логічного елемента І
(засобами онлайн-сервісу logic.ly)**

Дія	Очікуваний результат
Під'єднаємо до лампочки два перемикача у станах «вимкнено» через логічний елемент (вентиль) I (AND) – лампочка не горітиме	
Увімкнемо один перемикач – лампочка не горітиме:	
Увімкнемо другий перемикач – лампочка не горітиме:	
Увімкнено обидва перемикачі – лампочка горітиме:	

Позначення диз'юнкції може бути таким: A або B , $A + B$, $A \vee B$, $A \cup B$, A or B .

Результат застосування логічної операції АБО буде дорівнювати 1 тоді, і тільки тоді, коли хоча б на одному його вході буде 1. Приклад застосування логічної операції АБО засобами онлайн-сервісу logic.ly наведено у таблиці 2.23.

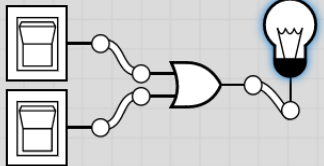
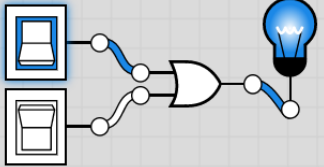
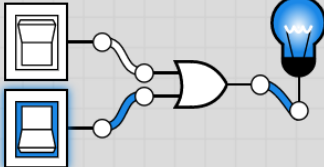
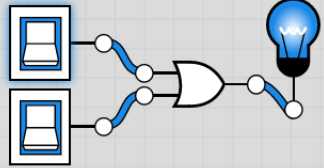
При введенні поняття «квантові вентиля» (базові логічні елементи/операції для квантового комп'ютера), важливо звернути увагу учнів, що розуміння квантових вентилів аналогічне до розуміння вентилів (логічних елементів, операцій) класичного комп'ютера, а значить знадобиться застосування попередніх знань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

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.

Таблиця 2.23

Інструкційна картка застосування класичного логічного елемента АБО
(засобами онлайн-сервісу logic.ly)

Дія	Очікуваний результат
Під'єднаємо до лампочки два перемикачі у станах «вимкнено» через логічний елемент (вентиль) АБО (OR) – лампочка не горітиме	
Увімкнемо перший перемикач – лампочка горітиме:	
Увімкнемо другий перемикач – лампочка горітиме:	
Увімкнемо обидва перемикачі – лампочка горітиме:	

В обов'язковому порядку слід розглянути інтерфейс хмаро орієнтованого сервісу IBM Quantum Composer (п. 2.3), 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.

Серед однокубітних доцільно найпершим розглянути *вентиль X* (операцію заперечення *NOT*) або інверсію, що змінює значення кубіта на протилежне. Вентиль *X* представляється унітарною матрицею другого порядку (це одна з трьох матриць Паулі). Вентиль *X* повертає кубіт навколо вісі x на 180° (π радіан):

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$


Приклад. Застосувати вентиль X до кету $|1\rangle$.


$$NOT|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle$$

За наявності часу та задля повного розуміння використаних термінів учням можна розповісти, що вентиль Паулі названий на честь одного із засновників квантової фізики, австрійця за походженням Вольфганга Ернста Паулі. У 1945 році він отримав Нобелівську премію з фізики за розробку принципу виключення, або принципу Паулі, в якому, по суті, говориться, що два електрони не можуть існувати в одному і тому ж квантовому стані. Роботу Паулі високо оцінював Альберт Ейнштейн, крім того, австрієць був близьким другом, відомих своїми досягненнями у квантової механіки, Нільса Бора і Бернарда Гейзенберга.

Корисним буде звернути увагу учнів, що у квантових обчисленнях використовуються лише оборотні операції, тобто ті, що є своєю власною інверсією. Учні повинні усвідомити, що будь-яка квантова логічна операція є оборотною – якщо двічі підряд застосувати до кубіту одну й ту ж саму операцію, то кубіт повернеться до свого первинного (вихідного) стану. Це означає, що як би ми не обернули вектор, ми завжди зможемо повернути його у те положення, в якому він був. Підтвердити зазначене можна на прикладі операції NOT для вектора $|0\rangle$ (аналогічно вже запропонованому прикладу з $|1\rangle$):

$$NOT|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} |0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 \\ 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle$$

Далі слід організувати застосування операції NOT до кубіту (кубітів) у графічному режимі сервісу IBM Quantum Composer – показати використання *вентилля* X . Продемонструвавши учням графічне позначення вентилля, треба акцентувати увагу на тому, як переглянути зміну стан кубіту після застосування вентилля (рис. 2.7).

Наступним доцільно буде ознайомити учнів з *вентилем* Y (IBM Quantum Composer позначається ) , що повертає кубіт навколо вісі y на 180° (π радіан), та представляється матрицею Паулі:

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

де $i = \sqrt{-1}$ – це уявна одиниця. На рис. 2.8 наведено приклад використання вентиля Y у IBM Quantum Composer.

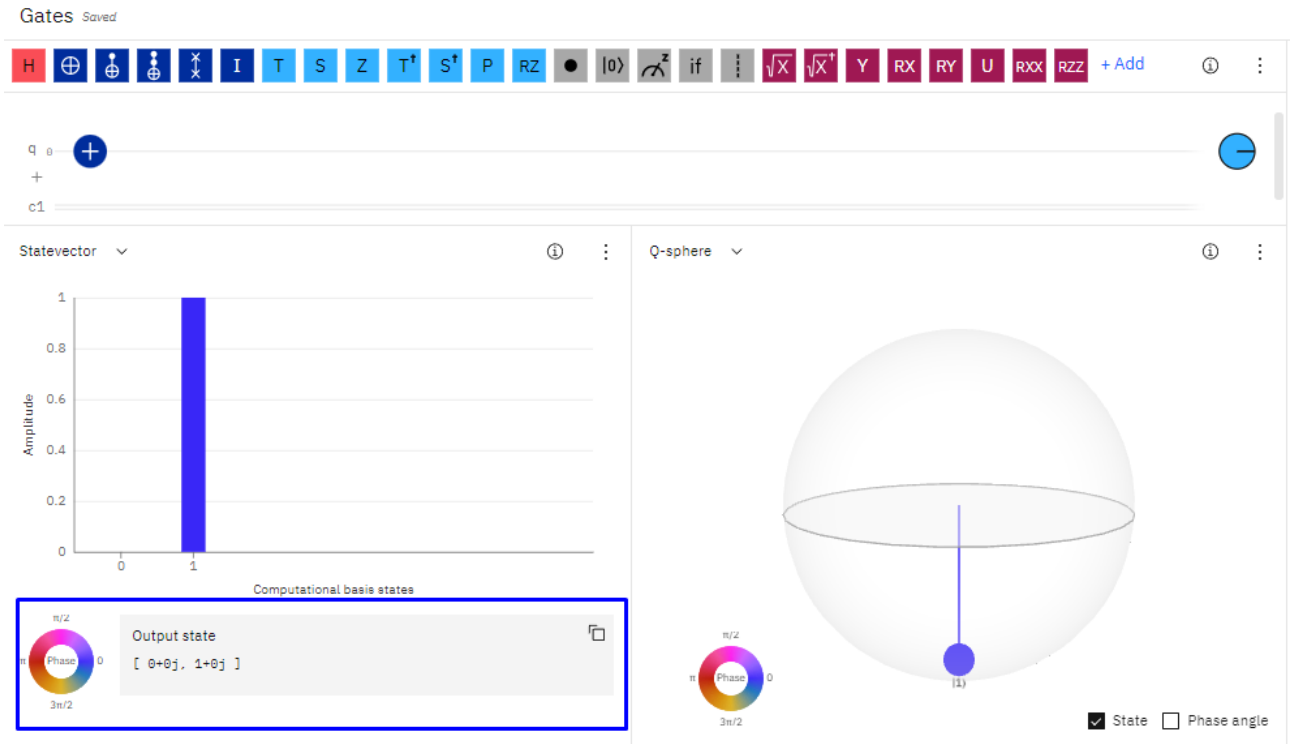


Рис. 2.7. Застосування вентиля X

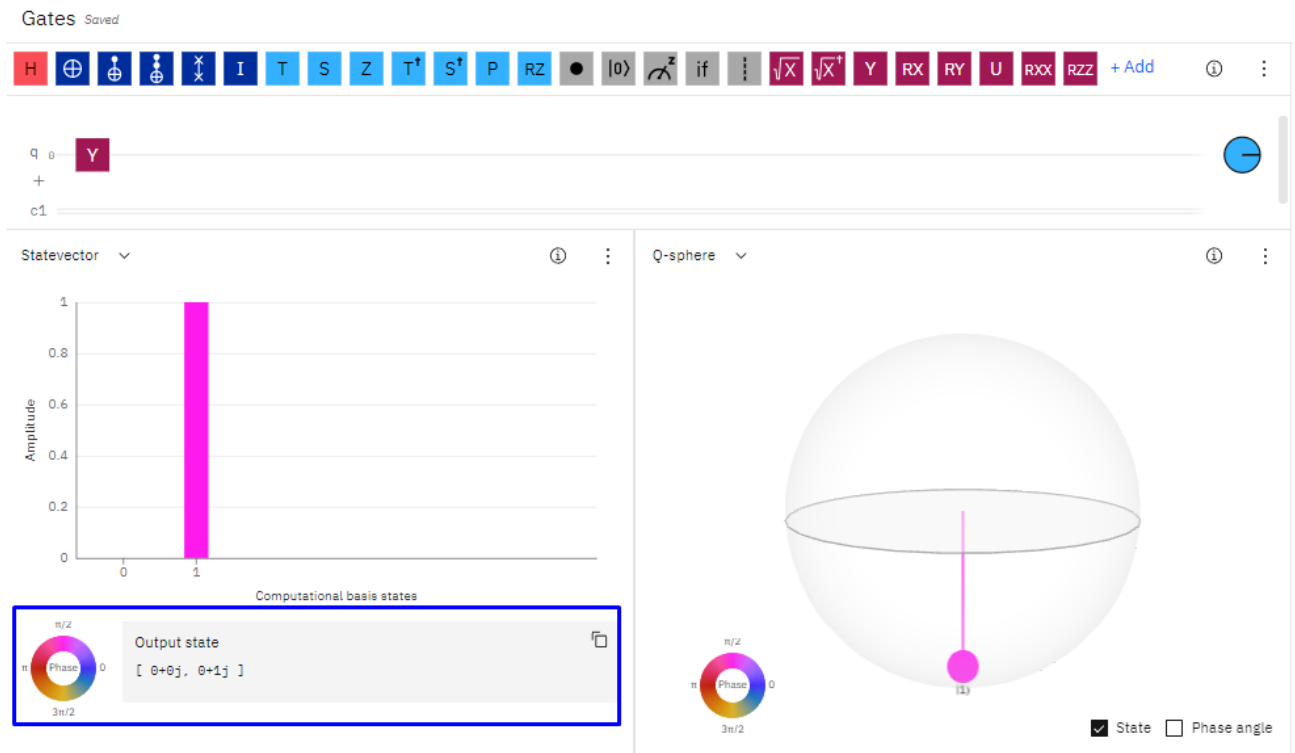
Після розгляду вентилів X та Y пропонується ознайомлення з *вентилем* Z , що у Quantum Composer позначається **Z** та при графічному представленні повертає кубіт навколо вісі z на 180° (π радіан) і представляється матрицею Паулі:

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} |1\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \\ 0 \cdot 0 + -1 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} = -|1\rangle$$

Слід звернути увагу учнів, що *вентиль* Z діє на кубіт тільки зі значенням $|1\rangle$, змінюючи його на $-|1\rangle$, а кубіт у стані $|0\rangle$ у ньому і залишається. На цьому етапі доцільно розглянути наступний приклад, де матриця Паулі Z діє на вектор $|0\rangle$, показавши, що значення вектора $|0\rangle$ не змінилося.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 1 + -1 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle$$

Рис. 2.8. Застосування вентиля Y

У IBM Quantum Composer можна запропонувати учням самостійно переконатися у результатах застосування вентиля Z на кубіти у станах $|1\rangle$ та $|0\rangle$. Не буде зайвим нагадування про те, що в IBM Quantum Composer всі кубіти знаходяться в нульовому стані. Потім поставити запитання: «Як перевести кубіт зі стану $|0\rangle$ у стан $|1\rangle$?» (очікувана відповідь: застосувати вентиль X).

На рис. 2.9 наведено просту графічну схему – очікуваний результат розв’язання поставленої задачі.

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.

Далі доцільно перейти до розгляду *вентиля Адамара*, повідомивши, що назва вентиля походить від прізвища французького математика Жака Адамара

(Jacques Hadamard), тому на квантових схемах зустрічаємо позначення вентилю H . Цікавим для учнів буде дізнатися, що в математиці багато понять носять ім'я цього видатного математика, хоча у дитинстві йдучи з батьком повз один із найпрестижніших навчальних закладів Франції Еколь Нормаль (École normale supérieure), малолітній Жак Адамар запитав: «Це тут вивчають математику? Ну, тоді я сюди не піду». Ось про такий парадоксальний випадок відомо з біографії генія математики, що з дитинства обожнював читання, захоплювався музикою, мовами і ботанікою й не любив розв'язувати арифметичні задачі. Для найбільш зацікавлених і встигаючих учнів можна запропонувати підготувати коротке повідомлення про математичні поняття, що мають у своїй назві прізвище видатного вченого Жака Адамара.

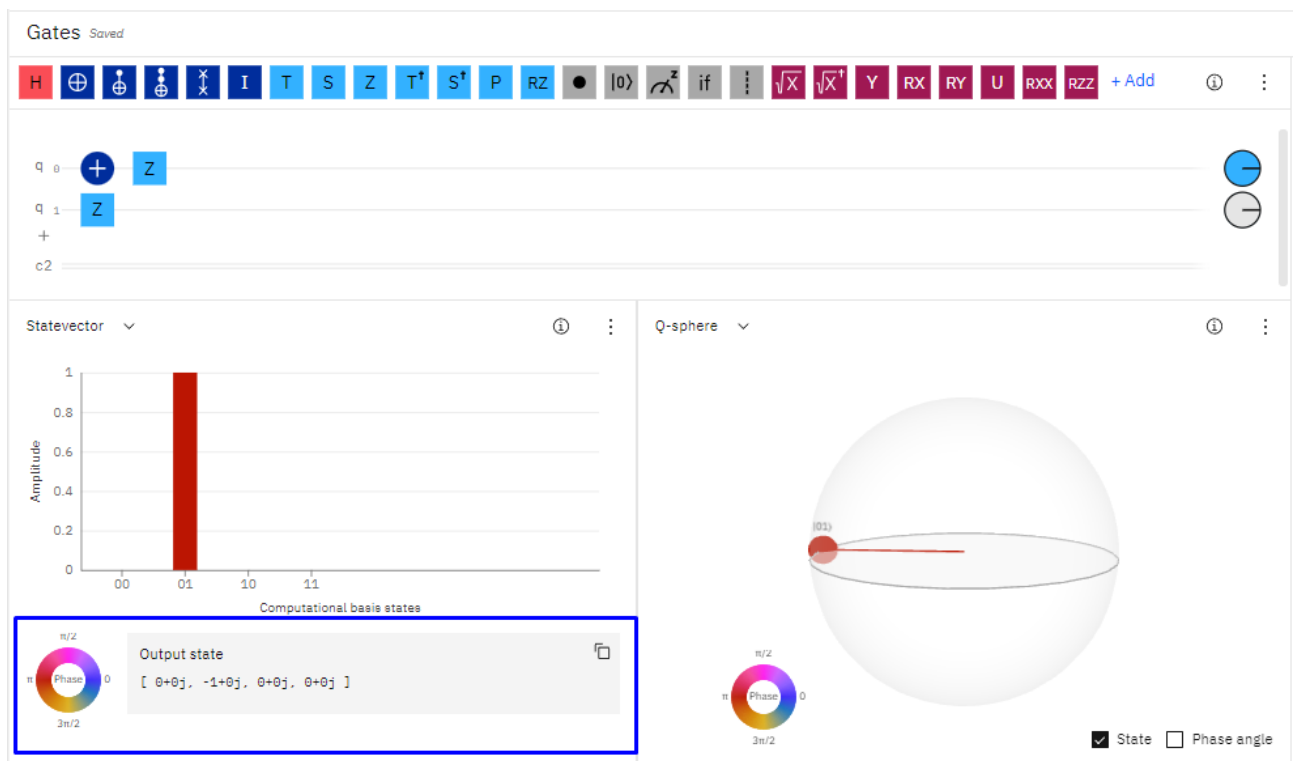


Рис. 2.9. Зразок застосування вентилю Z

Учням пропонується дізнатися про квантовий *вентиль Адамара*, що у IBM Quantum Composer позначається **H**, який переводить кубіт у стан суперпозиції та може виводити кубіт із стану суперпозиції без вимірювання. Можна повідомити, що вентиль Адамара виконує комбіноване обертання на π радіан

навколо вісі x та на $\pi/2$ навколо вісі y . Квантовий вентиль Адамара представляється унітарною матрицею Адамара:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

На цьому етапі розглядається приклад як математично відбувається переведення стану кубіту з нульового й одиничного у стан суперпозиції та навпаки (якщо учні готові, то можна ставити перед ними завдання самостійно виконати математичні дії множення матриці Адамара на відповідний вектор або ж разом виконати перетворення Адамара до кубіту $|0\rangle$, тоді для самостійного виконання буде – до кубіту $|1\rangle$):

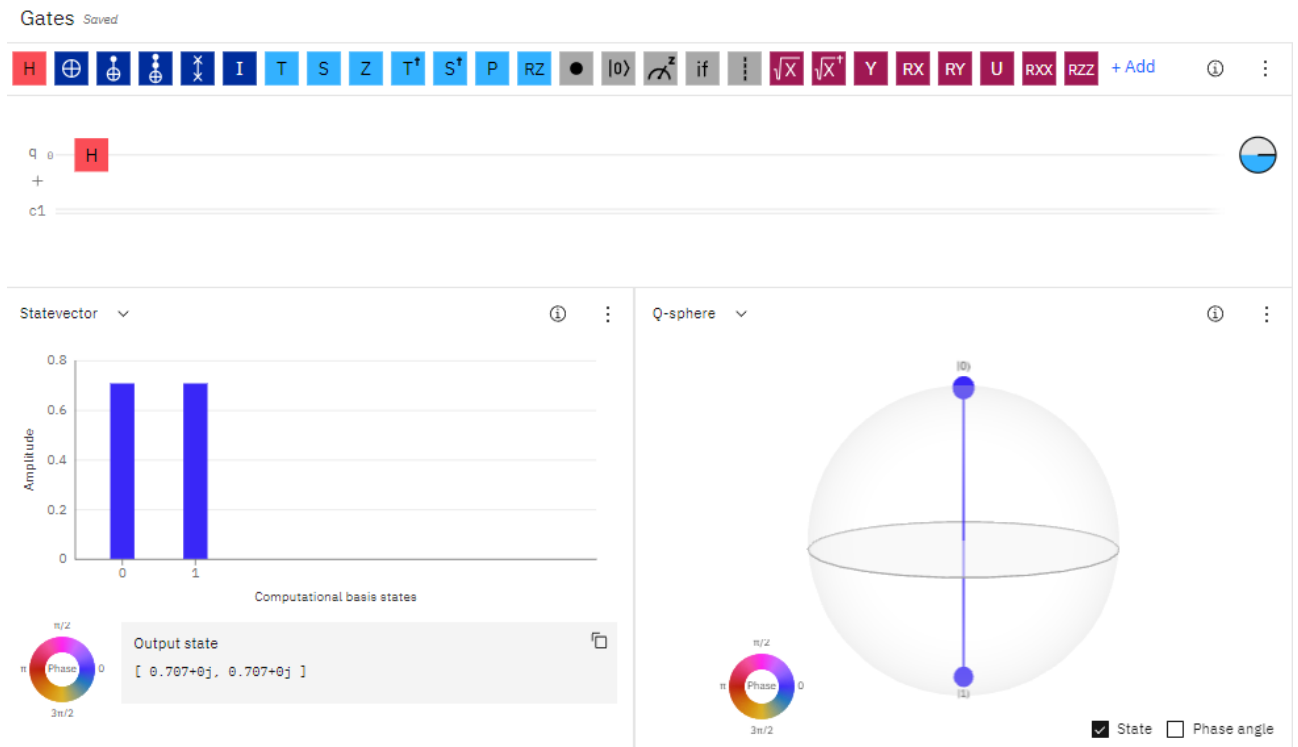
$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 + \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$H \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0 + \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$H \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Застосувати вентиль Адамара в IBM Quantum Composer учні повинні за зразком, наведеним на рис. 2.10. Доцільним буде створити схему із застосуванням вентиля Адамара до кубіту у стані $|0\rangle$ та $|1\rangle$ із обов'язковою інтерпретацією (коментуванням) отриманих результатів.

Рис. 2.10. Застосування вентиля H

Викладення матеріалу доцільно закріпити задачами такого типу: необхідно вказати вентиля, які раціонально застосувати, щоб перевести квантову систему із початкового у кінцевий стан. Починати слід із задач на одну операцію (використання одного вентиля) над одним кубітом, далі ускладнювати – виконувати над одним кубітом декілька операцій, виконувати над двома (трьома) кубітами однієї операції, виконувати над двома (трьома) кубітами декілька операцій. У таблиці 2.24 наведені умови задач, що треба розглянути першими.

Таблиця 2.24


Система задач на переведення квантової системи із початкового стану у кінцевий

Початковий стан	Кінцевий стан	Правильна відповідь
0	1	X
1	-1	Z
0	-1	X Z
0	-0	X Z X
0	0 +1	H
0	0 -1	H Z

Для подальшого формування умінь переводити квантову систему до

заданого стану учням можна запропонувати виконати завдання у середовищах мобільних застосунків. Наприклад: QLogic (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.paltangames.qlogic>), та Hello, quantum (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ibm.research.helloquantum>).

Наступними слід розглянути *керовані вентиля*. Учням пояснюється, що керовані вентиля діють на два й більше кубітів, де один або більше з них є керуючими для будь-якої операції.

Пояснення про керовані вентиля доцільно розпочати з *вентиля CNOT* (контрольне заперечення, Controlled NOT) – контрольоване заперечення, що в IBM Quantum Composer позначається  – інвертує другий кубіт тільки для тих вхідних квантових станів, в яких перший (керуючий) кубіт дорівнює одиниці. Тобто, один кубіт призначається контрольним, а другий – цільовим. Якщо контрольний кубіт дорівнює 1, то цільовий інвертується. Якщо контрольний кубіт 0, то цільовий не змінюється. Контрольний кубіт ніколи не змінюється. Якщо перший кубіт контрольний, а другий цільовий, то результати виконання будуть таким:

$$\begin{array}{l}
 00 \rightarrow 00 \\
 01 \rightarrow 01 \\
 10 \rightarrow 11 \\
 11 \rightarrow 10
 \end{array}$$

$$CX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Під час розгляду матриці контрольного заперечення CX , увага учнів повинна бути привернута, до елементів матриці, що не перетворюються (лівий верхній виділений фрагмент матриці) та той фрагмент, що еквівалентний операції NOT (правий нижній виділений фрагмент матриці).

Для практичного виконання учням можуть бути запропоновані завдання з тензорного множення:

$$CX|00\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |00\rangle$$

$$CX|01\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |01\rangle$$

$$CX|10\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |10\rangle$$

$$CX|11\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |11\rangle$$

Розглядаючи вентиль CX , учням треба повідомити, якщо контрольний (керуючий) кубіт знаходиться в суперпозиції, цей вентиль створює сплутаність (зв'язність, заплутаність).

Наступним кроком при поясненні керованих вентилів буде розгляд вентилів CY та CZ , що у IBM Quantum Composer позначені **CY** та **CZ** відповідно. Учням доцільно наголосити, що математично ці вентиляжі теж описуються матрицями, схожими на матрицю CX . Відмінність цих матриць у елементах, що розташовані у правому нижньому куті – ці чотири елементи є відповідними матрицями X , Y або Z .

$$CX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad CY = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad ZX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Далі можна запропонувати учням самостійно знайти результат застосування вентилів CY та CZ у математичному вигляді, використавши приклад з вентиляем CX , що був наведений вище.

Приклад застосування вентиляю CX у IBM Quantum Composer представлений на рис. 2.11.

Далі перед учнями доцільно поставити завдання застосувати вентиляжі CY та CZ на квантовій схемі у IBM Quantum Composer.

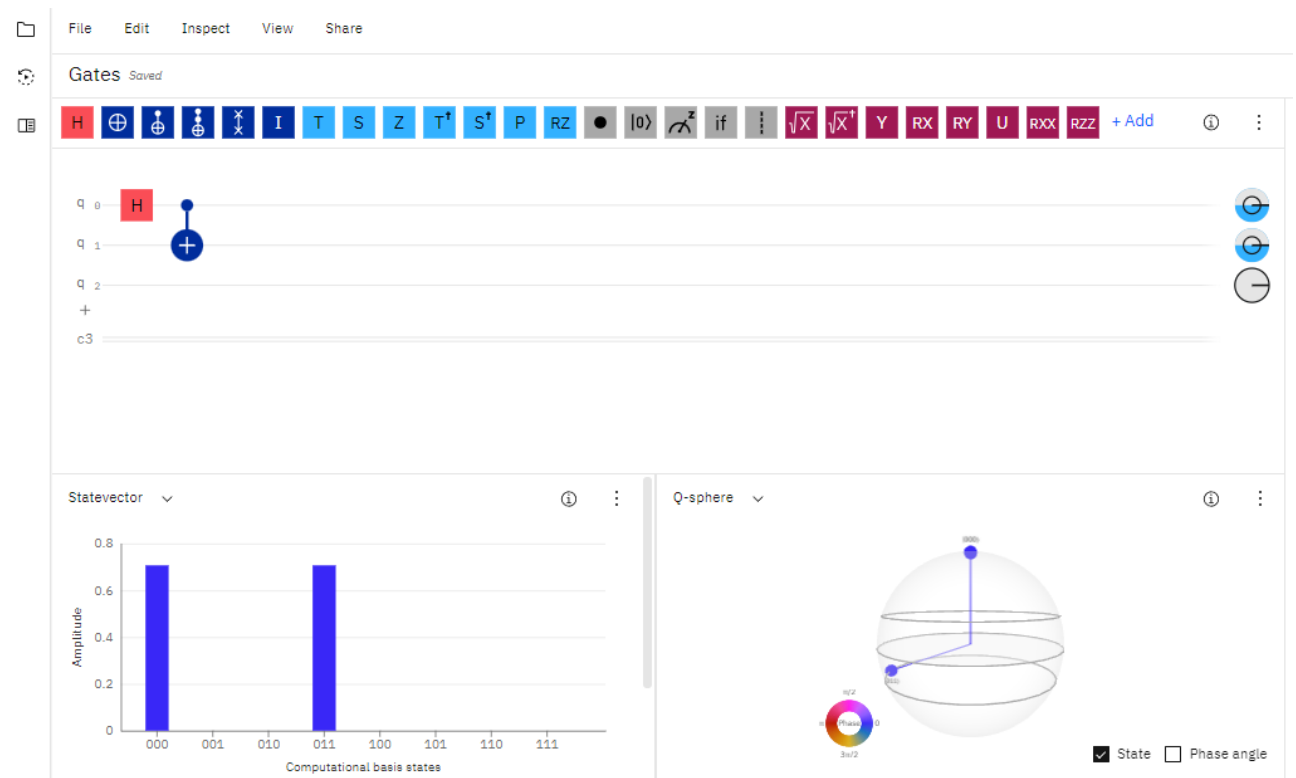





Рис. 2.11. Використання вентиля CX у IBM Quantum Composer

На наступному кроці треба перейти до знайомства з вентилям Тоффолі (CCNOT). Учні повинні знати, що це теж керований вентилю, однак він уже оперує трьома кубітами. Якщо перші два кубіти знаходяться в стані $|1\rangle$, він застосовує оператор X (вентилю X) до третього кубіту, інакше ніяких дій не виконуються.

При застосуванні вентиля Тоффолі у IBM Quantum Composer, окрім знайомства з позначенням , слід увести використання операції модифікатора керованого вентиля , який дозволяє налаштувати на квантовій схемі, які саме кубіти будуть задіяні цим вентилям.

Учням знадобиться уміння використовувати операцію розмежування (бар'єр)  для оформлення квантових схем.

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. 2.12:

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 вентилі 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 запуснути 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.

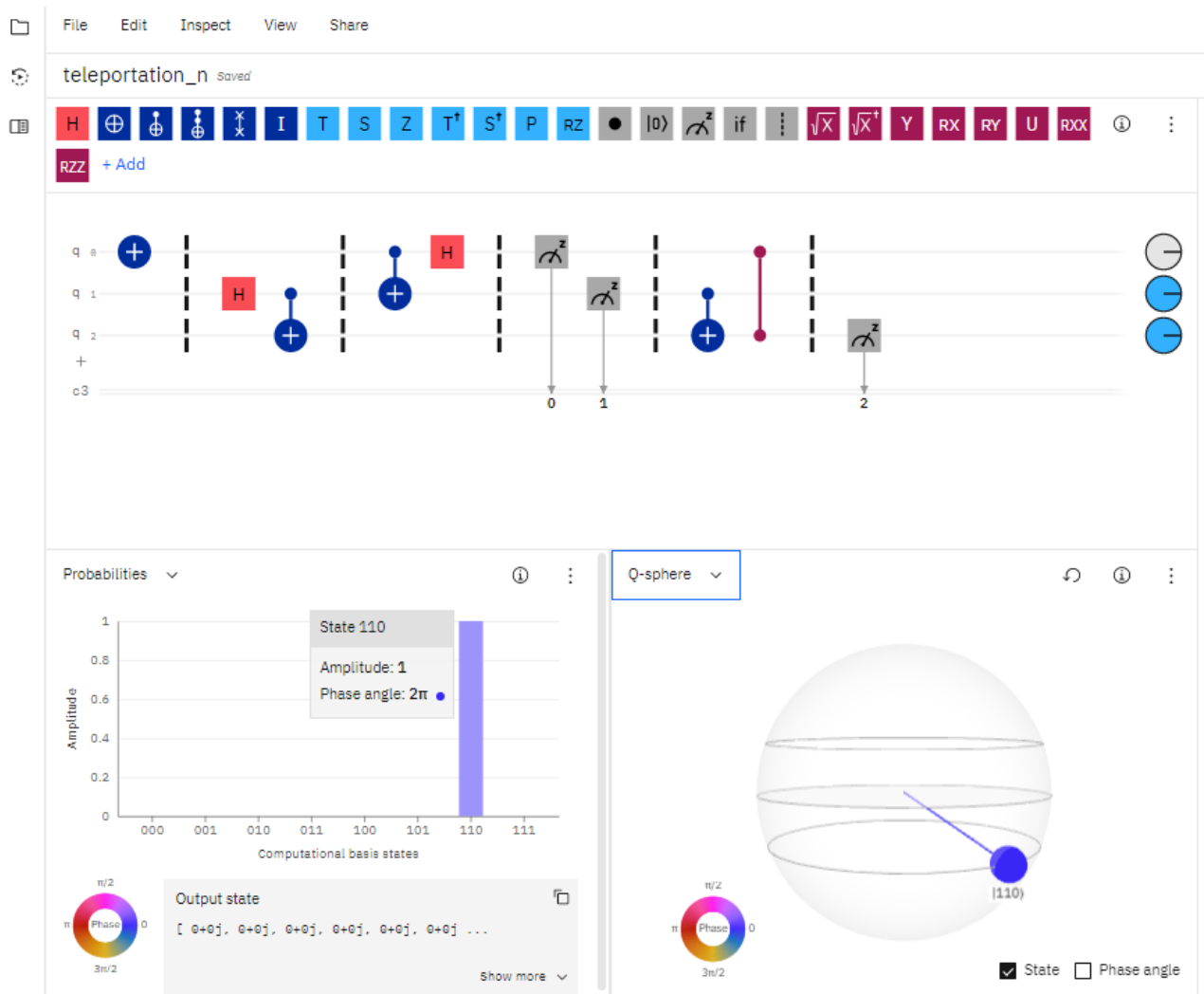


Рис. 2.12. Алгоритм квантової телепортації в IBM Quantum Composer

Отримавши знання про основні квантові вентиля, створивши квантову схему телепортації, учні готові перейти до наступного етапу навчання основ квантової інформатики – реалізувати 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),

послугуватися онлайн-сервісами з програмування, що підтримують роботу Python з модулем Qiskit, для реалізації квантових алгоритмів на квантових симуляторах і реальному квантовому обладнанні.

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.

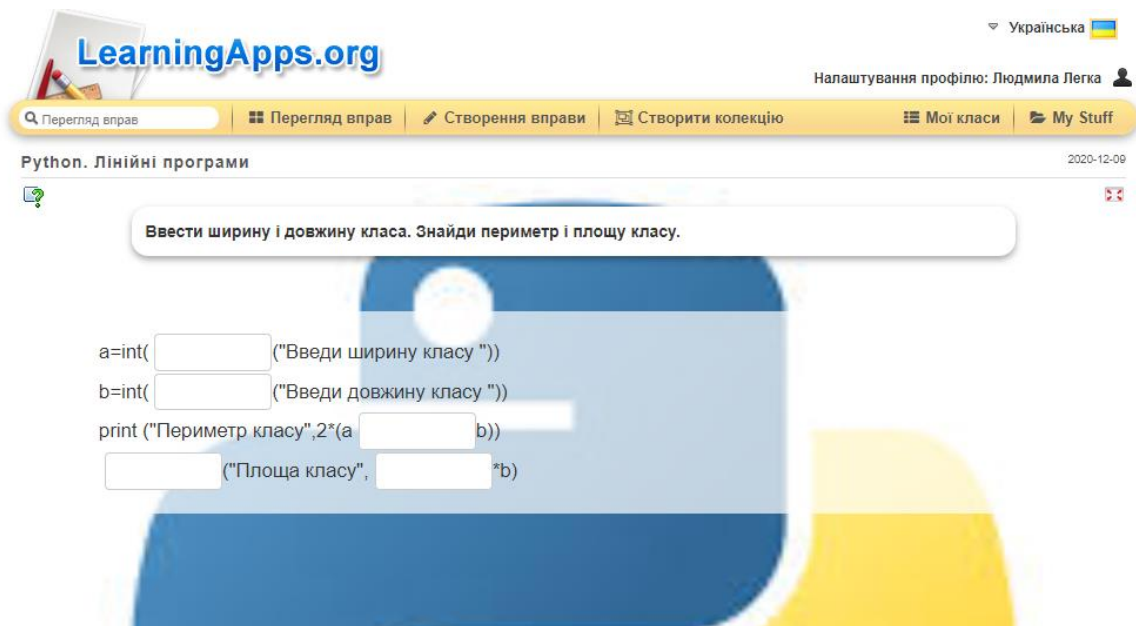


Рис. 2.13. Приклад інтерактивної вправи (1)

Повторенню підлягають такі теми: типи величин у Python; математичні та логічні операції; пріоритет операцій; типова структура Python-програми; оператори введення й виведення; логічні вирази; умовний оператор; оператори циклу; основні вбудовані функції. Повторення може бути організоване з використанням друкованої пам'ятки (Додаток Д), інтерактивних вправ (наприклад, <https://learningapps.org/17786751>, <https://learningapps.org/15861583> <https://learningapps.org/display?v=pgffh3zca20?>) та заздалегідь підготовлених прикладів реалізації базових алгоритмів із докладним (письмовим) їх

коментуванням. Зразки інтерактивних вправ представлені на рис. 2.13, 2.14, приклади програм – на рис. 2.15.

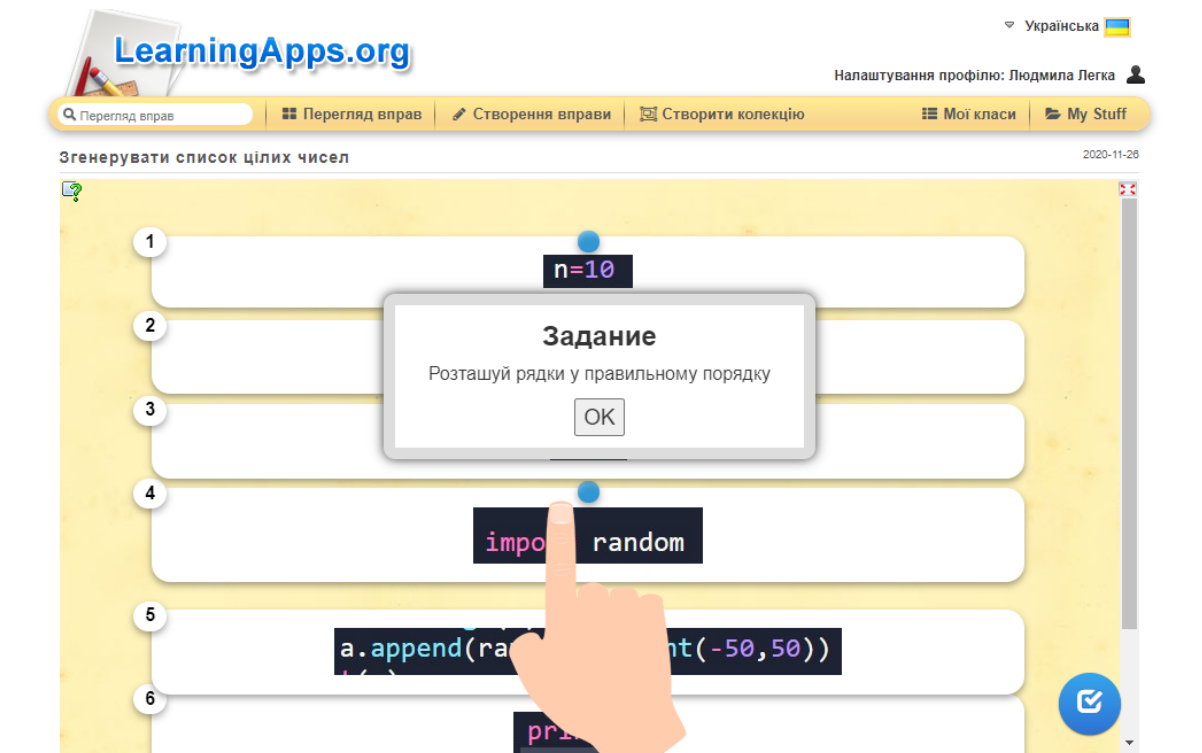


Рис. 2.14. Приклад інтерактивної вправи (2)

```

kom = int(input ("Увести номер команди:"))
if (kom == 1 or kom == 2 or kom == 5):
    kr = "Іспанія"
else:
    if (kom == 3 or kom == 7):
        kr = "Німеччина"
    else:
        if (kom == 4 or kom == 9 or kom == 10):
            kr = "Англія"
        else:
            if (kom == 6 or kom == 8):
                kr = "Португалія"
            else:
                kr = "Рейтинг невідомий"
print ("", kr)

# mas1 - це масив простих чисел
mas1 = [2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19,
23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59,
61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97]
mas2 = []
n = int(input ('Уведіть ціле число: '))
k1 = len(mas1)
for i in range (k1):
    if n == mas1[i]:
        mas2.append (mas1[i])
        break
    else:
        while ((n%mas1[i])!= 0):
            mas2.append (mas1[i])
            n = n//mas1[i]
k2 = len(mas2)
print ("Прості множники:")
for i in range(k2):
    print (mas2[i], end = " ")

```

Рис. 2.15. Приклади програм для виконання

(за підручником з інформатики В. Д. Руденка та ін., профільний рівень)

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 (режим доступу – <https://colab.research.google.com/>, рис. 2.16).

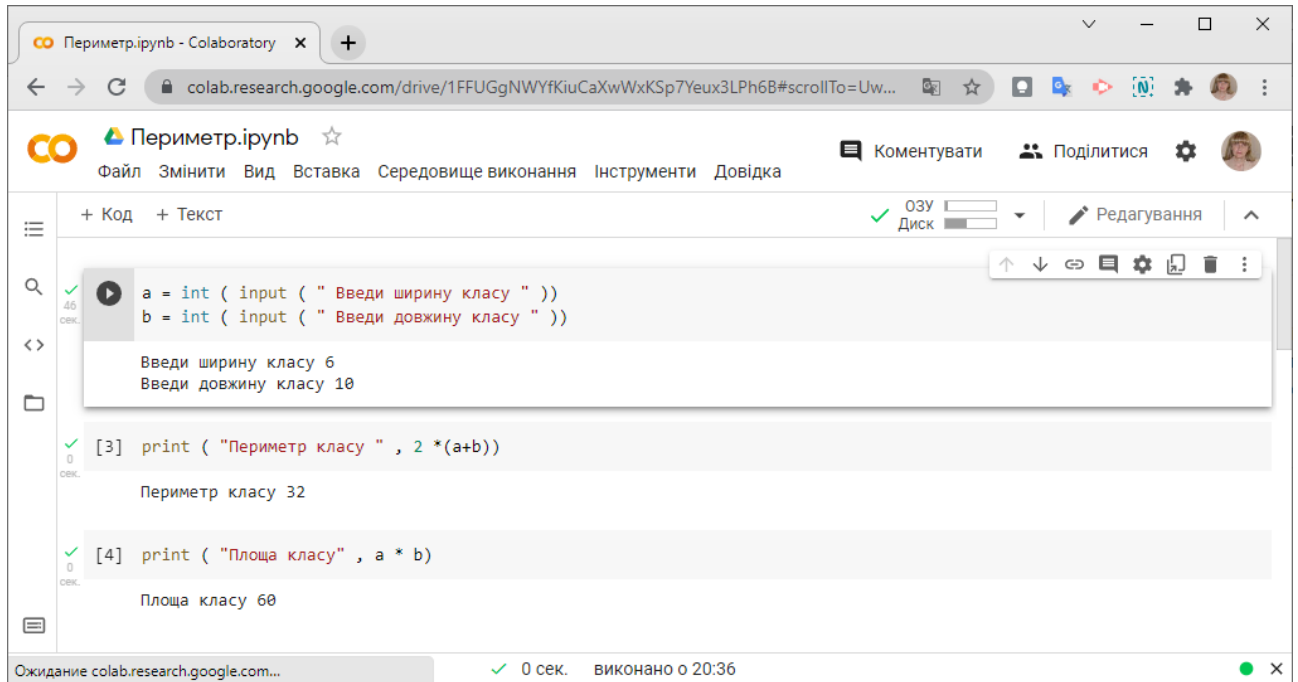


Рис. 2.16. Виконання програм мовою Python в онлайн-сервісі Google Colab

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

```
#ініціалізація виконання схеми на симуляторі
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')
#виконання схеми на ініціалізованому симуляторі
result = execute(circuit, backend=simulator,
shots=1024).result()

#виконання схеми на квантовому комп'ютері в IBM Quantum Lab:
IBMQ.load_account();
provider = IBMQ.get_provider(hub='ibm-q')
qcomp = provider.get_backend('ibmq_16_melbourn')
import numpy as np
```

Наступним кроком акцентуємо увагу учнів на способах відображення результатів роботи квантової програми на прикладах:

```
#відображення результатів у вигляді гістограми
from qiskit.visualization import plot_histogram
plot_histogram(result.get_counts(circuit))

#відображення результатів у вигляді схеми, спосіб 1
editor = CircuitComposer(circuit=circuit)
editor
```

або

```
#відображення результатів у вигляді схеми, спосіб 2
%matplotlib
circuit.draw(output='mpl')
```

Доцільно використати наведені способи у програмі, що реалізує алгоритм квантової телепортації.

Наступним розглядається квантовий *алгоритм Бернштейна-Вазірані*. Учням пропонується для самостійного пошуку завдання віднайти інформацію про вчених, іменами яких названо алгоритм (чи то на занятті, чи то у вільний час).

Учні мають дізнатися, що алгоритм Бернштейна-Вазірані призначений для пошуку n -бітного числа (або ж невідомого/прихованого рядка), схованого у «чорному ящику». «Чорний ящик» використовується як термін у техніці й кібернетиці для позначення об'єкта чи системи, про принципи дії яких нічого невідомо або будова й механізм роботи занадто складні, невідомі чи неважливі. Про «чорний ящик» достовірно відомо, що певному вхідному сигналу відповідає певний вихідний сигнал.

Отриманий лістинг квантового алгоритму Бернштейна-Вазірані треба запустити в IBM Quantum Lab, із подальшим детальним коментуванням кожного рядка програмного коду.

```
from qiskit import *
%matplotlib inline
from qiskit.tools.visualization import plot_histogram
s = '0011'
n = len(s)
circuit = QuantumCircuit(n+1,n)
circuit.h(range(n)) #circuit.h([0,1,2,3,4,5])
```

```

circuit.barrier()
circuit.x(n) #circuit.x(6)
circuit.h(n) #circuit.h(6)
#circuit.cx(5,6)circuit.cx(3,6)circuit.cx(0,6)
for ii, yesno in enumerate(reversed(s)):
    if yesno == '1':
        circuit.cx(ii,n)
circuit.barrier()
circuit.h(range(n))
circuit.barrier()
circuit.measure(range(n),range(n))
circuit.draw(output='mpl')
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')
result = execute(circuit, backend=simulator,
shots=1).result()
print(result.get_counts(circuit))
#importing Qiskit
from qiskit.providers.ibmq import least_busy
from qiskit import QuantumCircuit, ClassicalRegister,
QuantumRegister, transpile, assemble
plot_histogram(result.get_counts(circuit))
#importing Qiskit
from qiskit.providers.ibmq import least_busy
from qiskit import QuantumCircuit, ClassicalRegister,
QuantumRegister, transpile, assemble
IBMQ.load_account()
provider = IBMQ.get_provider(hub='ibm-q')
provider.backends()
IBMQ.load_account()
provider = IBMQ.get_provider(hub='ibm-q')
provider.backends()
backend = least_busy(provider.backends(filters=lambda x:
x.configuration().n_qubits <= 5 and
x.configuration().n_qubits >= 2 and
not x.configuration().simulator and
x.status().operational==True))
print("least busy backend: ", backend)
print("least busy backend: ", backend)

job_monitor(job, interval=2)
results = job.result()
answer = results.get_counts()
print(answer)
plot_histogram(answer)

```

Наступним кроком учням пропонується опис і програма квантового алгоритму Гровера – одного з найвідоміших алгоритмів в квантових обчисленнях. Завдання, яке вирішує цей алгоритм, часто називають «пошуком в базі даних». Однак точніше вважати цей алгоритм завданням пошуку.

Будь-яке завдання пошуку можна сформулювати математично за

допомогою абстрактної функції $f(x)$, що приймає елементи пошуку x . Якщо елемент x є рішенням задачі пошуку, то $f(x) = 1$. Якщо елемент x не є рішенням, то $f(x) = 0$. Завдання пошуку полягає в пошуку будь-якого елемента x_0 , для якого $f(x_0) = 1$.

Отриманий лістинг квантового алгоритму Гровера треба запусити в IBM Quantum Lab, знов-таки надавши детальне коментування програмного коду.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from qiskit import IBMQ, Aer, assemble, transpile
from qiskit import QuantumCircuit, ClassicalRegister,
QuantumRegister
from qiskit.providers.ibmq import least_busy
n = 2
grover_circuit = QuantumCircuit(n)
def initialize_s(qc, qubits):
    """Apply a H-gate to 'qubits' in qc"""
    for q in qubits:
        qc.h(q)
    return qc
grover_circuit = initialize_s(grover_circuit, [0,1])
grover_circuit.draw()

grover_circuit.cz(0,1) #Oracle
grover_circuit.draw()

grover_circuit.h([0,1])
grover_circuit.z([0,1])
grover_circuit.cz(0,1)
grover_circuit.h([0,1])
grover_circuit.draw()

sim = Aer.get_backend('aer_simulator')
grover_circuit_sim = grover_circuit.copy()
grover_circuit_sim.save_statevector()
qobj = assemble(grover_circuit_sim)
result = sim.run(qobj).result()
statevec = result.get_statevector()
from qiskit_textbook.tools import vector2latex
vector2latex(statevec, pretext="|\\psi\\rangle =")

grover_circuit.measure_all()

aer_sim = Aer.get_backend('aer_simulator')
qobj = assemble(grover_circuit)
result = aer_sim.run(qobj).result()
counts = result.get_counts()
from qiskit.tools.visualization import*
plot_histogram(counts)
```

```

#quantum comp
provider = IBMQ.load_account()
provider = IBMQ.get_provider("ibm-q")
device = least_busy(provider.backends(filters=lambda x:
x.configuration().n_qubits >= 3 and not
x.configuration().simulator and
x.status().operational==True))
print("Running on current least busy device: ", device)
from qiskit.tools.monitor import job_monitor
transpiled_grover_circuit = transpile(grover_circuit, device,
optimization_level=3)
job = device.run(transpiled_grover_circuit)
job_monitor(job, interval=2)

```

Пояснення наступного квантового алгоритму – *алгоритму Шора* – доцільно розпочати розповіддю, що хоч будь-яке ціле число має унікальний розклад на добуток простих чисел, вважається, що пошук простих множників є складною проблемою. Насправді, безпека наших онлайн-транзакцій базується на припущенні, що розкладання цілих чисел із тисячею чи більше цифр практично неможливе. Це припущення було поставлено під сумнів у 1995 році, коли Пітер Шор запропонував поліноміальний квантовий алгоритм для задачі факторингу. Алгоритм Шора, мабуть, є найбільш драматичним прикладом того, як парадигма квантових обчислень змінила уявлення про те, які проблеми слід вважати вирішеними. Спробуємо реалізувати квантовий алгоритм Шора, зважаючи на те, що сучасні квантові комп'ютери ще не спроможні розкласти на множники числа з тисячі цифр. Навіть із сотні цифр, поки не є можливим. Однак, очевидно, що розвиток квантових комп'ютерів настільки стрімкий, що скоро деякі складні задачі будуть виконані.

Програмна реалізація алгоритму Шора громіздка (урочного часу може не вистачити), тому варіант побудови алгоритму та його запуску на квантовому обладнанні за схемою на рис. 2.17 можна пропонувати здібнішим учням, а іншим – скористатися бібліотекою готових квантових алгоритмів (рис. 2.18).

На прикладі поданого коду (рис. 2.18) здійснюється пояснення щодо підключення бібліотек та особливостей використання їх функцій. Доречним буде запропонувати учням звернутися до довідки IBM Quantum Lab, для вивчення питання про те, які квантові алгоритми реалізовані у вигляді функцій та подані у

відповідних бібліотеках. Обов'язково слід звернути увагу учнів на виведення результату.

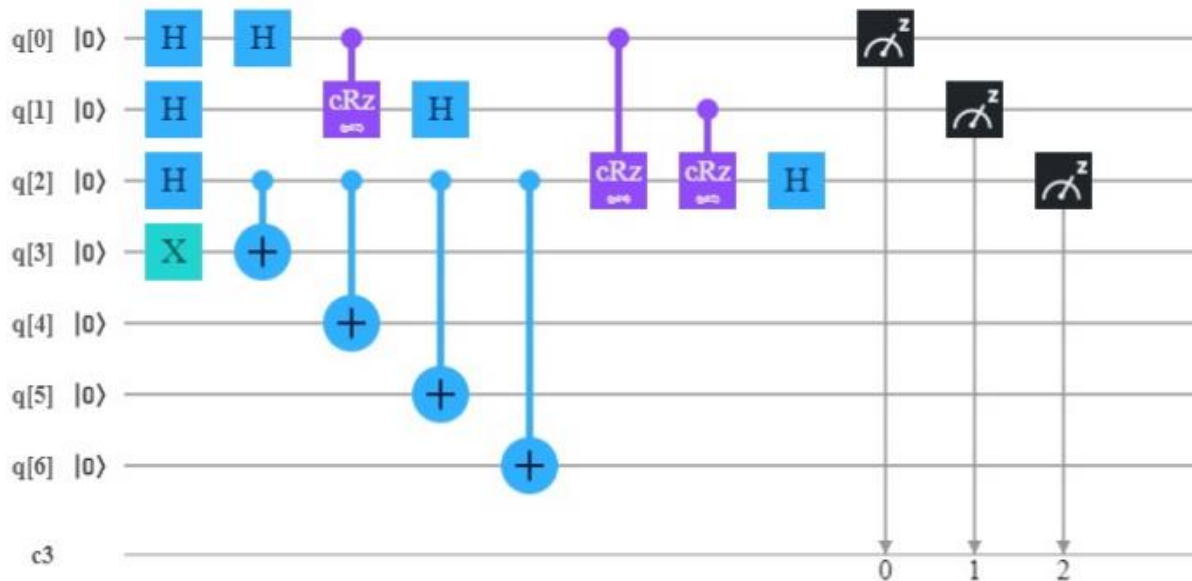


Рис. 2.17. Квантова схема алгоритму Шора

```
[1]: from qiskit import *
      # Loading your IBM Q account(s)
      provider = IBMQ.load_account()
```

```
[3]: from qiskit.aqua.algorithms import Shor
      from qiskit.aqua import QuantumInstance
      import numpy as np
      from qiskit.tools.visualization import plot_histogram
      backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
      quantum_instance= QuantumInstance(backend, shots=100)
      my_shor=Shor(N=15, a=2, quantum_instance=quantum_instance)
      Shor.run(my_shor)
```

```
[3]: {'factors': [[3, 5]], 'total_counts': 26, 'successful_counts': 8}
```

Рис. 2.18. Програмний код з використанням бібліотеки квантових алгоритмів

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.

2.4.3. Методика навчання змістової лінії «Квантові телекомунікаційні технології»

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.

Розпочати знайомство учнів із особливостями квантової комунікації доцільно із нагадування учням про те, що ще в античні часи люди зіткнулися з проблемою: як передати повідомлення, щоб його не міг зрозуміти ніхто сторонній. Найвідоміший давній шифр – це шифр Цезаря, коли в алфавіті всі букви зсувалися на певну кількість знаків, наприклад, на три букви: А змінюється на Г, Б – на Д і так далі. Проблема такого шифру в тому, що розгадати його досить легко. Обов'язково слід зауважити, що з розвитком суспільства потреба безпечного передавання відомостей залишається актуальною. Це питання науки криптографії.

Учням треба повідомити, що у 1970-х роках з'явилася асиметрична *криптографія*. Її ідея полягає у використанні закритого і відкритого ключа. Продемонструвати її можна за допомогою алгоритму Діффі-Хеллмана. Розпочати евристичну бесіду можна з припущення, що існує два абонента: Аліса і Боб. Обидва абоненти знають деякі два числа, g і p , які не є секретними і можуть бути відомі також іншим особам.

Учні дізнаються, що для створення секретного ключа на першому етапі Аліса й Боб генерують великі випадкові числа. У Аліси це буде число a , у Боба – число b . Потім Аліса обчислює значення A як залишок від ділення ga на p і надсилає його Бобу, а Боб обчислює значення B як залишок від ділення gb на p і

надає Алісі. Навіть, якщо зловмисник може отримати обидва ці значення, він не зможе втрутитися у процес передавання, а значить і змінити їх.

Далі повідомляємо, що на другому етапі Аліса на основі наявного у неї a й отриманого по мережі B обчислює значення остачі від ділення Ba на p , що дорівнює остачі від ділення gab на p . У той же час, Боб використовує b і отримане по мережі A . Аліса й Боб отримують однакове число K , що дорівнює остачі від ділення gab на p , яке можна використовувати в якості секретного ключа. При досить великих числах зловмисник (його у подібних задачах часто називають Євою), щоб дізнатися це число K , повинен витратити багато часу на обчислення.

Учні мають усвідомити, що основна ідея асиметричної криптографії в тому, що в ній використовуються завдання, які легко вирішити в одну сторону і складно – в іншу. Найпопулярнішим таким завданням є розкладання на прості множники. Зробити це набагато складніше, ніж перемножити два простих числа. І це складно не тільки для людини, але й для комп'ютера, особливо якщо це просте число складається з сотні знаків. Обов'язково слід звернути увагу учнів, що класична асиметрична криптографія заснована на тому, що зворотну задачу вирішити швидко дуже складно.

Доречно буде усно поставити учням тривіальне питання: «Поміркуйте, чи можна розкласти на множники число 91?» Хід роздумів має бути приблизно таким – «На 2 не ділиться, на 3 не ділиться, на 5 не ділиться. Можливо воно просте? А значить не ділиться ні на що, крім себе та одиниці.» Можна поставити питання: «Чи встиг хтось за цей час розкласти?» Далі наводимо обернене завдання: «Усно перемножити числа 7 і 13». Більшості учнів, зазвичай, вистачає декілька секунд, щоб отримати те саме число 91.

Треба наголосити, що квантовий комп'ютер зможе швидко розкласти числа на множники, тоді запропонована система шифрування, покладена в основу класичного розподілу ключів, виявиться недосконалою.

Принципова відмінність квантового шифрування полягає в тому, що це перша в історії людства система розподілу ключів, для якої є математичне доведення того факту, що вона є стійкою (не зламною) – навіть з усіма

необмеженими обчислювальними потужностями та технологіями, які не заборонені законом фізики.

У ході бесіди учням слід розповісти, що перший квантовий протокол BB84 для секретного розподілу ключів було розроблено Чарльзом Беннетом та Жілем Brassardом у 1984 році. Для його опису можна використати рольову модель, в якій представлені Аліса та Боб, що обмінюються інформацією, а також шкідлива Єва, яка хоче цю інформацію перехопити та використати у своїх цілях. Аліса і Боб – умовні позначення взаємодіючих агентів у таких областях, як криптографія, комп'ютерна безпека та фізика, використовуються для зручності пояснення роботи мережевих протоколів: фраза «Аліса надсилає Бобу повідомлення, яке зашифроване його відкритим ключем» набагато легше сприймається, ніж «сторона А посилає стороні Б повідомлення, зашифроване відкритим ключем сторони Б». Згодом сформувалися традиції, якими іменами позначати яких учасників процесу. Розуміємо, що «Аліса» й «Боб» не обов'язково позначають людей, це можуть бути, наприклад, комп'ютерні програми, що діють від імені людей.

Ставимо задачу, що Алісі потрібно передати Бобові повідомлення. Однак Аліса боїться пересилати своє повідомлення без шифрування, але нічого, крім одноразового блокнота, використати не може. Аліса й Боб для обміну ключами особисто зустрітися не могли, оскільки вони живуть на далекій відстані, припустимо, навіть у різних галактиках. Аліса й Боб мають квантовий канал передачі. Його й буде використовувати Аліса для генерації ключа для зашифрування повідомлення.

Далі описуємо дії щодо передавання та вимірювання стану фотонів. Аліса послідовно посилає Бобу фотони (кванти світла), з однією з чотирьох поляризацій: горизонтальною (під кутом 0°) « \rightarrow », вертикальною (під кутом 90°) « \uparrow », діагональною зліва-направо (під кутом 45°) « \swarrow » та діагональною справа-наліво (під кутом 135°) « \searrow ». Поляризація для кожного чергового надісланого фотона обирається випадково. Звичайно ж, це повинен бути реально випадковий процес, але через його відсутність можна скористатися і генератором

псевдовипадкової послідовності, але залишається ризик успішного підбору зловмисником Євою цієї псевдовипадкової послідовності. Нехай Аліса надіслала Бобу ось таку послідовність поляризованих фотонів (рис. 2.19, рядок 1).

1	Послідовність фотонів Аліси		/	/	—	\			—	—
2	Послідовність аналізаторів Боба	+	x	+	+	x	x	x	+	x
3	Результати вимірювань Боба	0	0	1	1	1	0	1	1	0
4	Аналізатори обрано правильно	+	+		+	+			+	
5	Ключ	0	0		1	1			1	

Рис. 2.19. Квантовий протокол BB84

Боб має два аналізатори: один «+» розпізнає вертикально-горизонтальну поляризацію, інший – «x» – діагональну. Для кожного фотона Боб випадково обирає один із аналізаторів та записує тип аналізатора (рис. 2.19, рядок 2).

Прилад «+» вимірює горизонтальні і вертикальні фотони з абсолютною точністю, а при попаданні в нього діагонального фотона цей прилад дає результат «—» з ймовірністю $\frac{1}{2}$ і результат «|» з ймовірністю $\frac{1}{2}$. Аналогічно прилад «x» з абсолютною точністю вимірює діагональні фотони, а для горизонтальних і вертикальних фотонів дає значення «/» або «\» з ймовірністю $\frac{1}{2}$. Приклад результатів вимірювань наведено у рядку 3 (рис. 2.19). Боб і Аліса зв'язуються через відкритий канал зв'язку, і Аліса повідомляє Бобу, які виміри він зробив правильним типом приладу, а які – неправильним. Боб викреслює неправильні виміри, і в результаті виходить двійковий ключ з рядка 4. Значення ключа виходять таким чином: у разі вертикально-горизонтальної («прямокутної») поляризації вертикально-поляризований фотон означає 0, горизонтально-поляризований є 1; у разі діагональної поляризації фотон, поляризований під кутом 45° означає 0, а при 135° є 1. Цей ключ секретний, і його знають лише Аліса та Боб.

Наступним слід з'ясувати, як Аліса й Боб можуть бути впевнені, що дані по каналу зв'язку не перехопила зловмисниця Єва? Оскільки Єва не може знати, яка саме поляризація фотонів Аліси, вона також випадково буде застосувати два

різних типів приладів для вимірювання поляризації «+» та «х». Однак, коли Єва виміряла фотони, отримані від Аліси, вона «хлопнула» їхні хвильові функції, і тепер, навіть якщо вона пересилає те ж саме повідомлення Бобу, послідовність вже зовсім не та, яку посилала Аліса, а саме та, яку отримала Єва у процесі своїх вимірів. Боб, випадково застосовуючи свої прилади, знову вимірює отримані ним фотони. Після власного вимірювання Боб зв'язується з Алісою, й вони порівнюють використані для вимірювання прилади. Як і у випадку без Єви, Боб викреслює ті біти, для отримання яких він використовував неправильний прилад. Якщо в Аліси й Боба опиняються різні ключі, то це результат злодіянь Єви.

Під час ознайомлення учнів із особливостями будови систем квантової комунікації, звертаємо увагу, що на відміну від стандартних волоконно-оптичних телекомунікаційних елементів, додатковим елементом систем квантової комунікації є інтерферометри – такі вимірювальні пристрої, де фотон може йти двома різними шляхами й інтерферувати, або взаємодіяти сам з собою, виявляючи свої квантові властивості.

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 встановлюються 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 розподіляти 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.

2.5. Експериментальна перевірка методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Розробка й апробація теоретичних положень дослідження проходили у три етапи:

- 1) *аналітико-констатувальний етап* (2018-2019 рр.);
- 2) *проектувально-пошуковий етап* (2019-2020 рр.);
- 3) *формульовально-узагальнювальний етап* (2020-2021 рр.).

Дослідження мало спіралеподібний діалектичний характер: на кожному етапі дослідження розроблялися, уточнювалися та перевірялися положення, покладені в основу етапу, визначалися задачі етапу; розроблені теоретичні положення реалізовувались у ході експериментальної роботи, на основі аналізу результатів якої знов уточнювалися теоретичні положення тощо. Критерієм, що визначав завершення процесу дослідження, стало досягнення його мети та повна

реалізація завдань дослідження.

На першому – *аналітико-констатувальному* – етапі дослідження (2018-2019 рр.) було встановлено, що наявний зміст шкільної інформатики ґрунтується на вивченні інформаційно-цифрових технологій, що орієнтовані на роботу з комп'ютерами виключно класичної архітектури. Тоді як у різних сферах цифрового суспільства, де необхідністю є швидке опрацювання даних величезного обсягу (при молекулярному моделюванні, логістиці та фінансовому прогнозуванні, метеорології, криптографії тощо, і до чого не завжди можуть бути застосовані класичні комп'ютери), все більшої практичної значущості набувають нові технології – квантові.

Перспективність квантових технологій зумовлює розпочати вивчення їх основ вже на уроках профільної (старшої) школи, а складність навчального матеріалу (основ квантової фізики, основ квантової теорії інформації, основ квантового програмування та криптографії) може бути вирішена за рахунок:

а) виваженого адаптування змісту навчання під вікові особливості та рівень пізнавальних інтересів здобувачів освіти;

б) розроблення повного комплексу освітніх ресурсів (перш за все підручника або навчального посібника, презентацій та/або відео, електронних робочих зошитів) або загальнодоступного навчального курсу;

в) забезпечення учителів якісною і докладною методичною підтримкою.

Основне завдання другого – *проектувально-пошукового* – етапу дослідження (2019-2020 рр.) полягало у формуванні компонентів авторського варіанту методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв – визначенні змісту навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв, форм та методів, у доборі апаратно-програмних засобів навчання квантової інформатики у ЗЗСО.

Було спроектовано першу версію програми факультативного курсу «Основи квантової інформатики» (табл. 2.25) за результатами опанування відкритого масового онлайн-курсу «Квантовые вычисления (Quantum computing)» на платформі Coursera та змістом навчальних матеріалів (текстові та

відеоматеріали англійською) від IBM Quantum Experience. Окрім того, було розроблено пакет навчальних матеріалів для учнів та розпочато їх подання у вигляді однойменного електронного навчального курсу.

Таблиця 2.25

**«Основи квантової інформатики»:
проект змісту факультативного курсу (17 годин)**

№	Тематика уроків
Розділ 1. Сучасні цифрові технології. Вступ до квантової інформатики (3 години)	
1	Цифрові технології: історія становлення, поточний стан, перспективи розвитку
2	Арифметичні основи роботи класичного комп'ютера
3	Логічні основи роботи класичного комп'ютера
Розділ 2. Математичні основи квантової інформатики (3 години)	
4	Комплексні числа та дії з ними
5	Робота з об'єктами лінійної алгебри: вектори
6	Робота з об'єктами лінійної алгебри: матриці
Розділ 3. Основи квантових обчислень за допомогою алгоритмів, реалізованих на схемах (6 годин)	
7	Ключові поняття квантових обчислень
8	Квантові схеми та середовища їх проектування
9	Квантовий венти́ль заперечення
10	Квантовий венти́ль Адамара
11	Квантовий венти́ль контрольного заперечення
12	Квантові вентиля́ Тоффолі та Фредкіна
Розділ 4. Основні квантові алгоритми та їх реалізація на схемах та мовою програмування (5 годин)	
13	Основні квантові алгоритми та особливості їх реалізації мовою програмування
14	Алгоритм квантової телепортації
15	Алгоритм Дойча-Йожи
16	Квантовий алгоритм факторизації цілого числа
17	Алгоритм Гровера

Остаточне визначення компонентів реальної методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв стало підставою для переходу до наступного етапу – формувально-узагальнювального.

На третьому, *формувально-узагальнювальному*, етапі (2020-2021 рр.) було здійснено впровадження методики навчання основ квантової інформатики у формі факультативного курсу «Основи квантової інформатики»; визначено структуру, зміст, критерії та рівні сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв; перевірено ефективність методики та її

вплив на формування компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Формувалися лише експериментальні групи, до складу яких увійшли учні 10 та 11 класів (табл. 2.26).

Таблиця 2.26

Розподіл учнів по класах на формувально-узагальнювальному етапі

Заклад загальної середньої освіти	Клас	Загальна кількість учнів	Взяли участь у експерименті
КЗШ № 90	10А	24	12
	10Б	20	10
КЗШ № 1	10	25	12
КСШ № 9	11	23	11
Разом			45

Докладний опис процесу визначення й уточнення структури й змісту компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв представлено у п. 1.3 та 2.2.

Розв'язання ж задачі визначення критеріїв, показників та рівнів сформованості означених компетентностей передбачає необхідність оцінити рівень сформованості 41 компоненти (8 груп компетентностей, по кожній групі 2-10 складових). Причому деякі з них можуть бути оцінені вчителем лише в процесі спостереження за навчальною діяльністю учнів. Така оцінка є якісною. Здійснювати її можна за матрицями компетентностей (критеріями сформованості компетентностей), користуючись 4-бальною шкалою (0 – початковий рівень сформованості; 1 – середній рівень сформованості; 2 – достатній рівень сформованості; 3 – високий рівень сформованості).

Матриці компетентностей (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 постала проблема розробки засобу оцінювання рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв, який дозволяв би, зокрема, здійснити вхідне та вихідне оцінювання, надавав більшу мобільність та мінімізував залежність від особистості того, хто здійснює оцінювання.

Одним із найбільш зручних інструментів оцінювання є тестування, оскільки його результати легко піддаються формалізації та подальшому опрацюванню. У рамках тестування неможливо повністю імітувати навчальну діяльність, але для деяких компетентностей можливо дібрати завдання різного рівня складності, спрямовані на перевірку володіння певними знаннями та уміннями, провідними для даної компетентності.

Рівень сформованості компетентностей з основ квантової інформатики до початку навчання за програмою факультативного курсу визначався за даними тестування-опитування (Додаток М). Серед завдань (питань) були як обов'язкові, так і додаткові (уточнюючі). Ціллю обов'язкових для відповідей запитань було самовизначення рівня обізнаності в окремих питаннях квантової інформатики. Якщо варіантами відповідей на обов'язкові (закриті) питання анкети-тесту були «0 – ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)» або «1 – цікавився, але самостійно мало що зрозумів», це відповідало початковому рівню сформованості компетентностей з основ квантової інформатики відповідної групи; якщо варіантами відповідей на обов'язкові питання були «2 – маю певні знання (уявлення) або уміння» або «3 – знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них» і при цьому були надані змістовні уточнення на додаткові (відкриті) запитання, це відповідало другому (середньому) рівню сформованості відповідної групи компетентностей.

Вхідне оцінювання рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв (учасників експерименту) не показало суттєвих відмінностей між учнями 10 або 11 класів різних закладів освіти, проте показало, що більшість учнів не знайомі із квантовими технологіями.

Вихідне оцінювання рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв за результатами навчання за програмою факультативу здійснювалося за результатами підсумкового тестування.

Рівень сформованості компетентностей учнів ліцеїв з основ квантової інформатики визначається за шкалою, наведеною у таблиці 2.27.

Таблиця 2.27

Визначення рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв за результатами тестування

Рівень сформованості компетентностей	Бали (у відсотках)
початковий	[0 %; 25 %)
середній	[25 %; 50 %)
достатній	[50 %; 75 %)
високий	[75 %; 100 %]

По кожній групі компетентностей відмічена позитивна динаміка зміни рівнів сформованості (табл. 2.28, рис. 2.20–2.27).

Величини позитивних змін різняться по кожній групі компетентностей, що пов'язуємо, по-перше, із різним обсягом 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.

Динаміка рівнів сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Групи	компетентності з фізичних основ квантових технологій				компетентності з математичних основ квантової інформатики				компетентності із забезпечувальних технологій				компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків				компетентності з квантових обчислень та моделювання				компетентності з квантових датчиків та метрології				компетентності з квантової комунікації				практичних навичок та загальних компетенцій							
	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий	початковий	середній	достатній	високий				
ЕГ-до	30	15	0	0	17	28	0	0	40	5	0	0	41	4	0	0	41	4	0	0	44	1	0	0	42	3	0	0	18	27	0	0	18	27	0	0
ЕГ-після	6	20	16	3	4	23	15	3	8	22	13	2	5	23	15	2	5	19	18	3	10	25	9	1	4	15	23	3	3	7	20	15	3	7	20	15

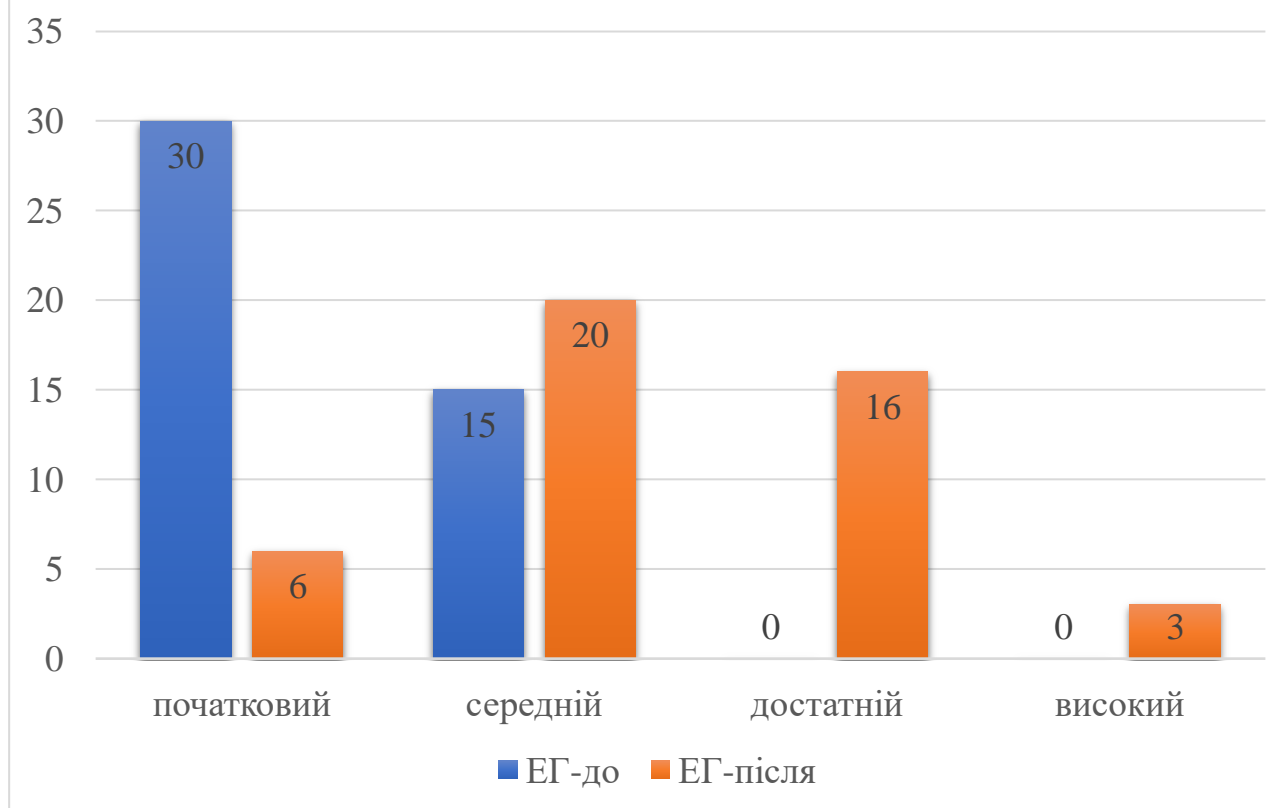


Рис. 2.20. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з фізичних основ квантових технологій

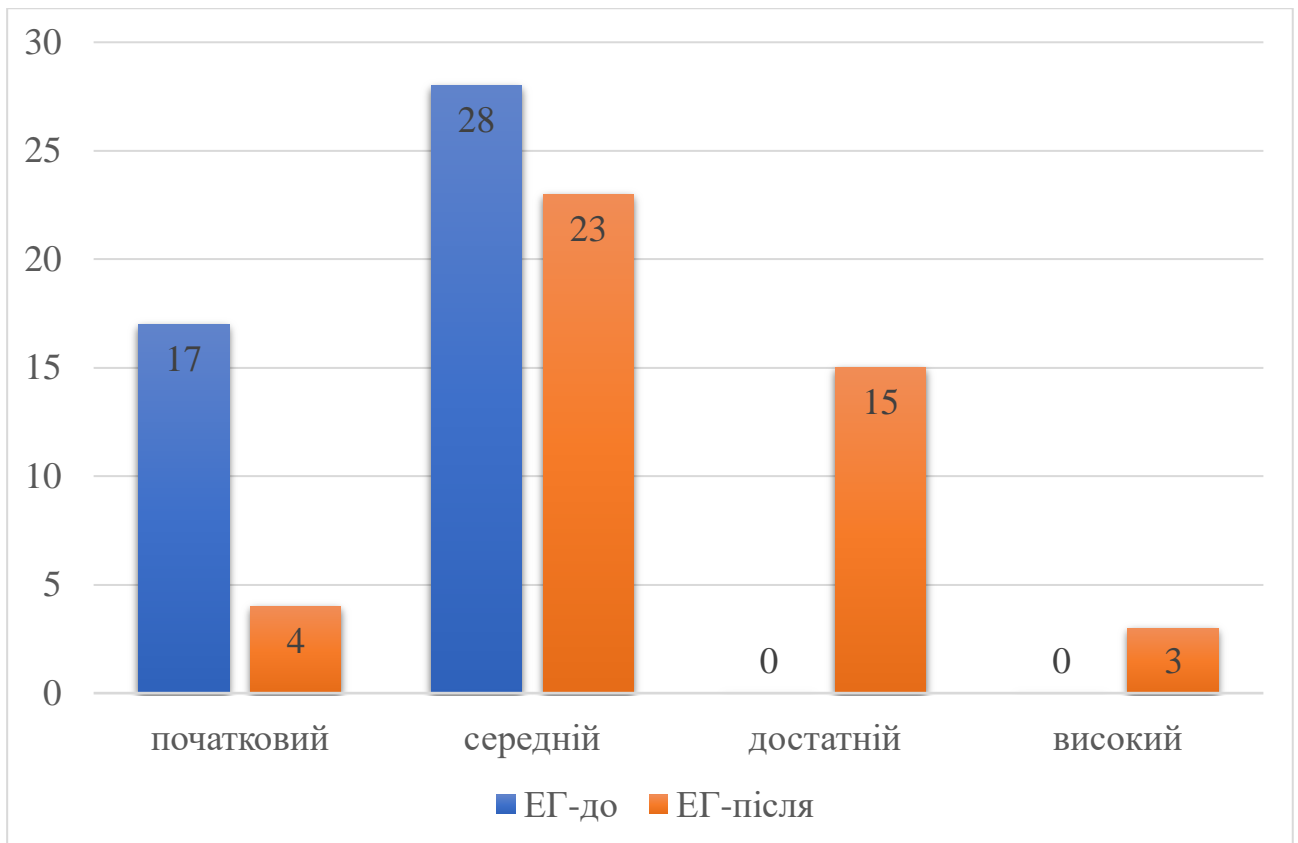


Рис. 2.21. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з математичних основ квантової інформатики

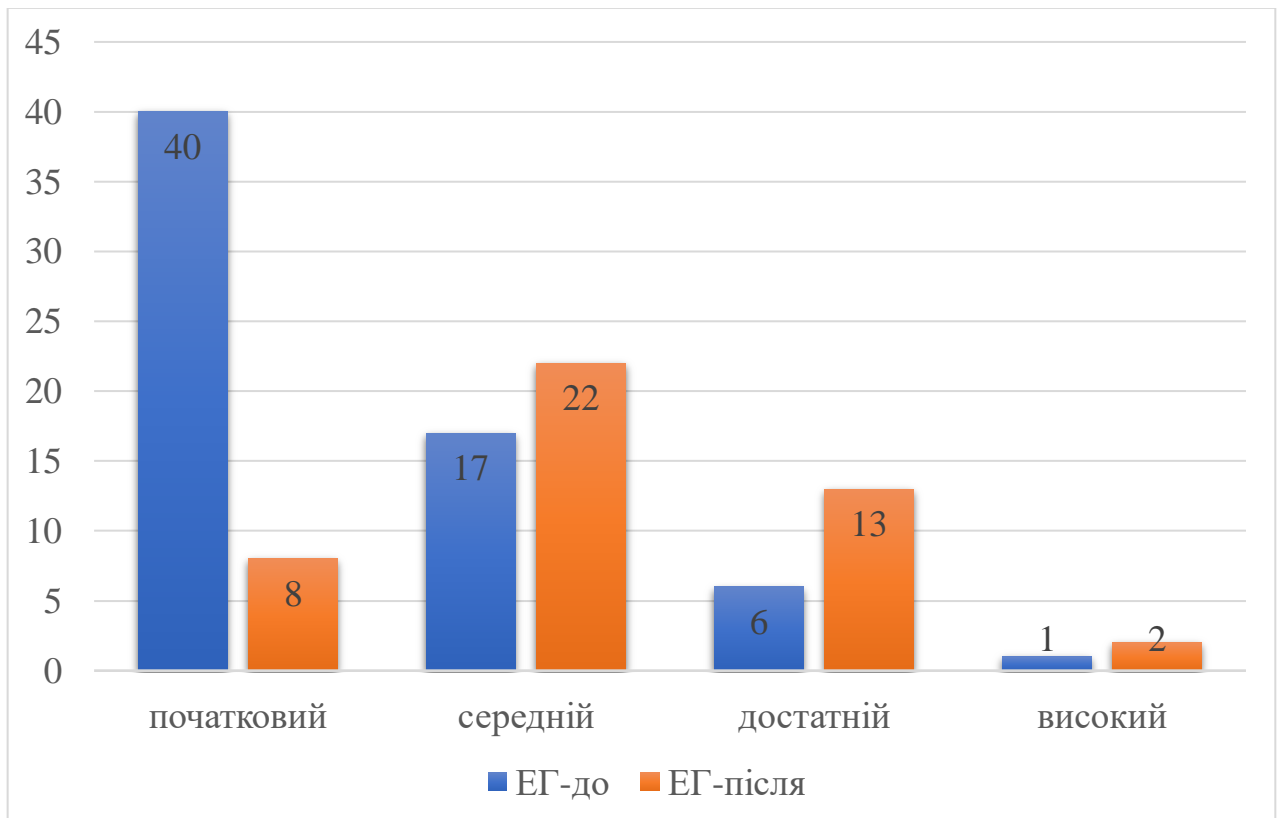


Рис. 2.22. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей із забезпечувальних технологій

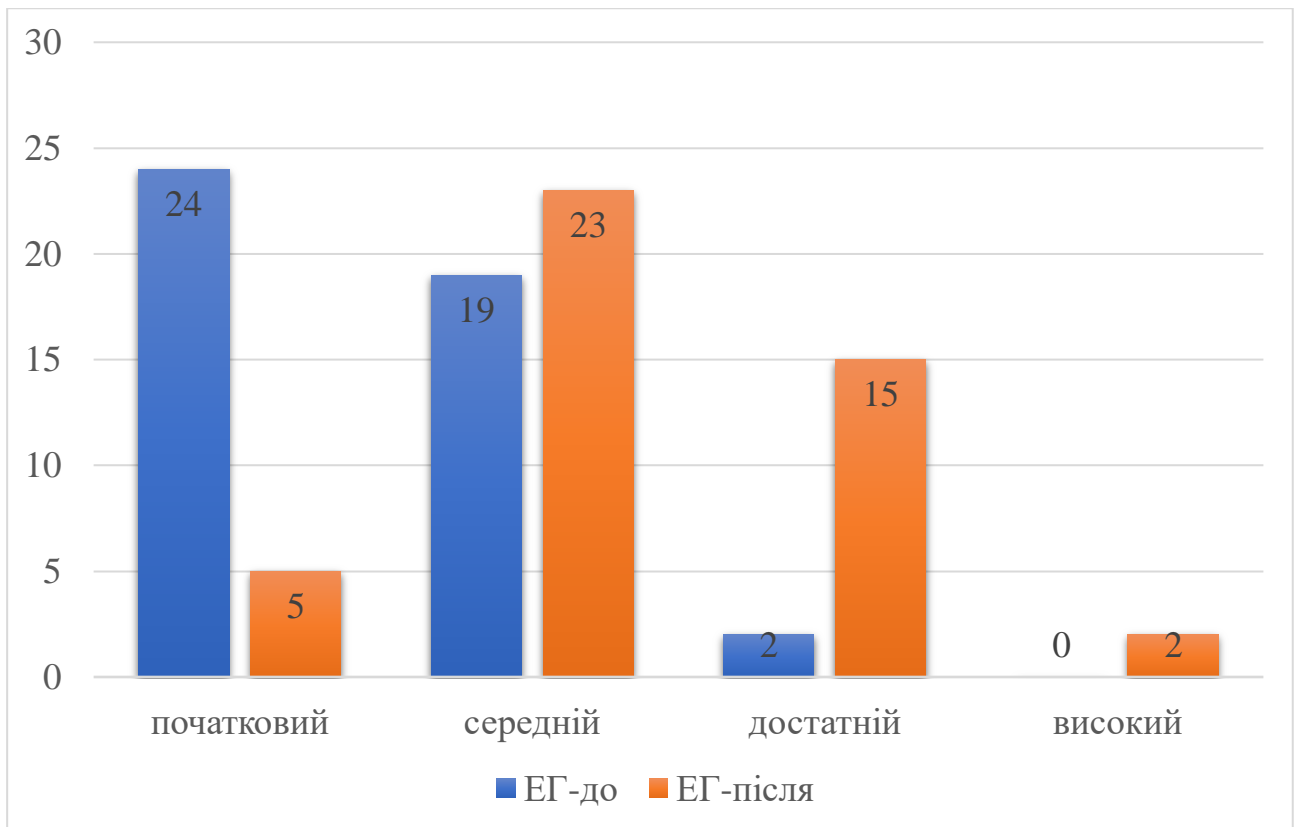


Рис. 2.23. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків

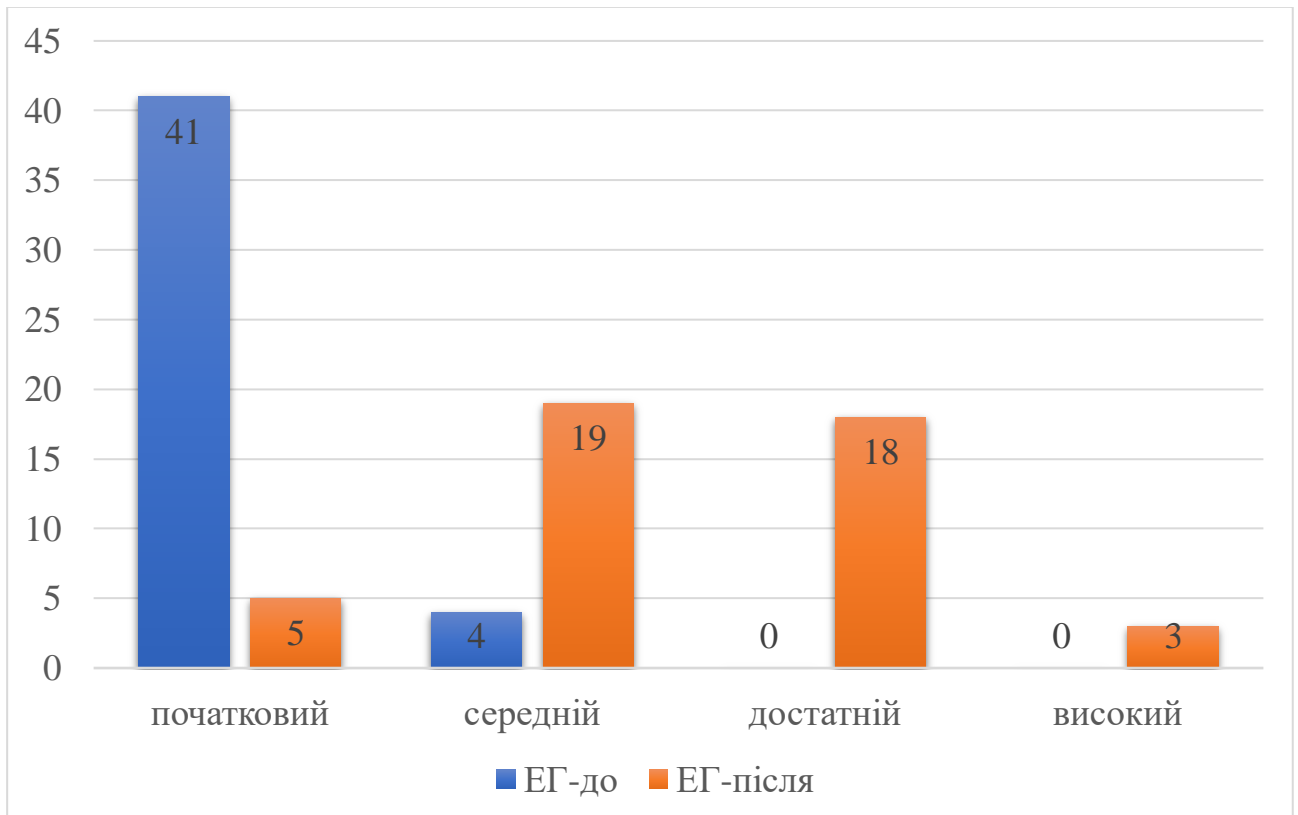


Рис. 2.24. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з квантових обчислень та моделювання

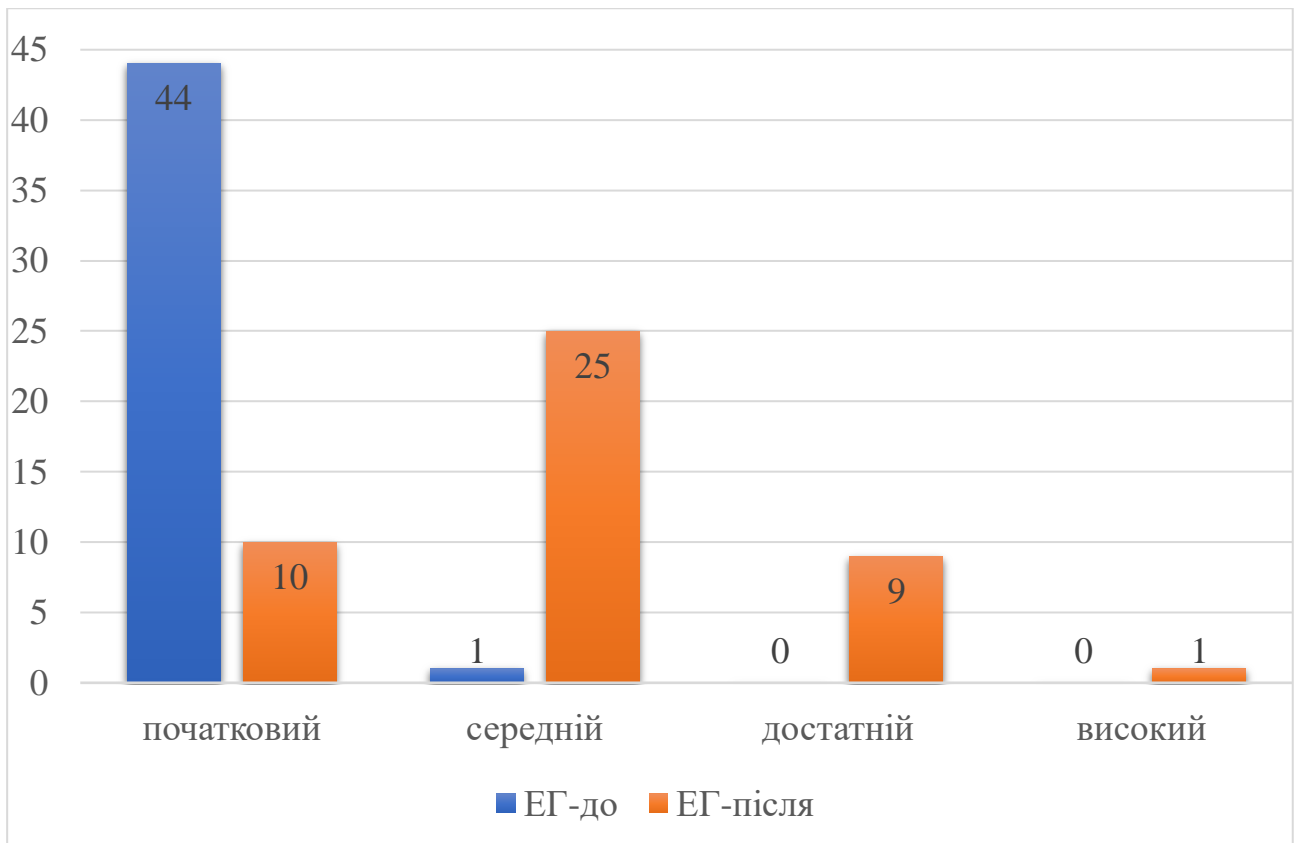


Рис. 2.25. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з квантових датчиків та метрології

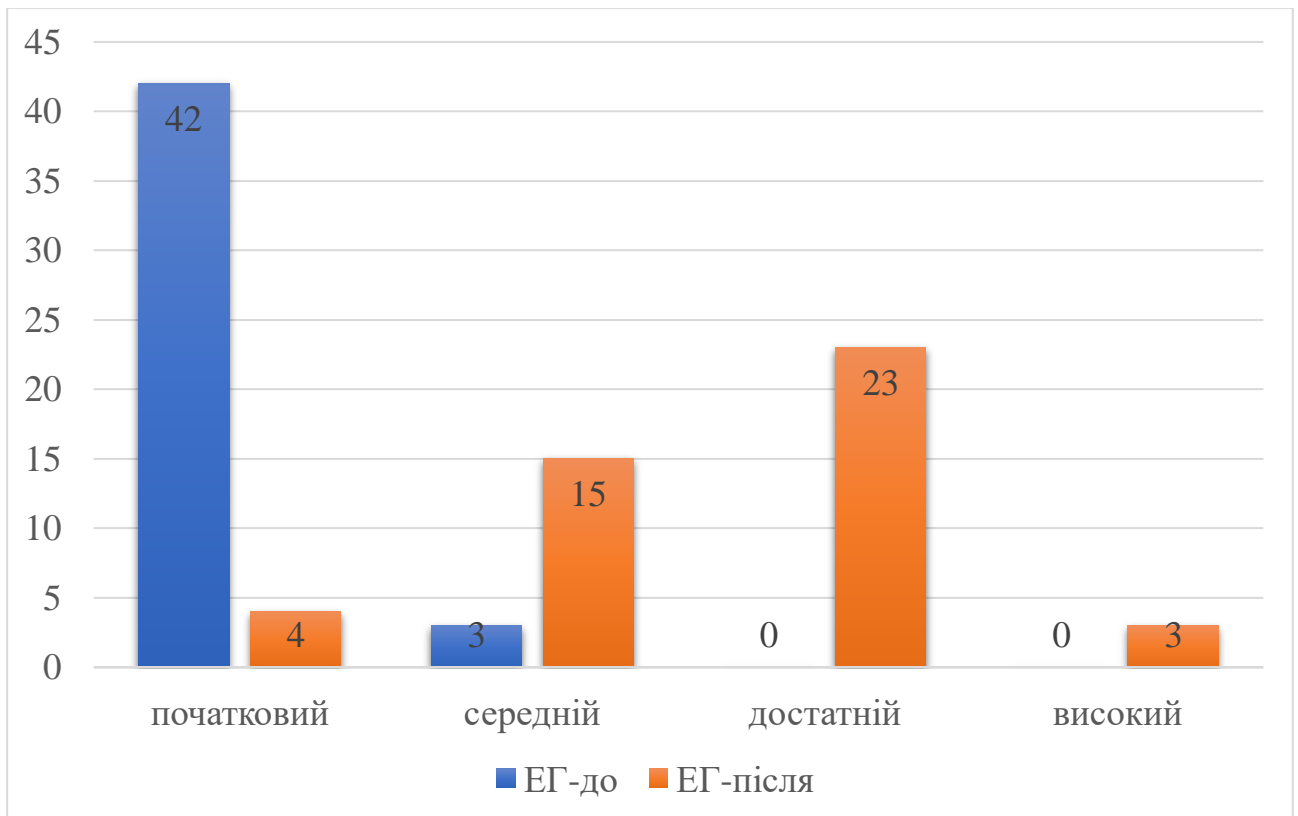


Рис. 2.26. Динаміка зміни рівнів сформованості компетентностей з квантової комунікації

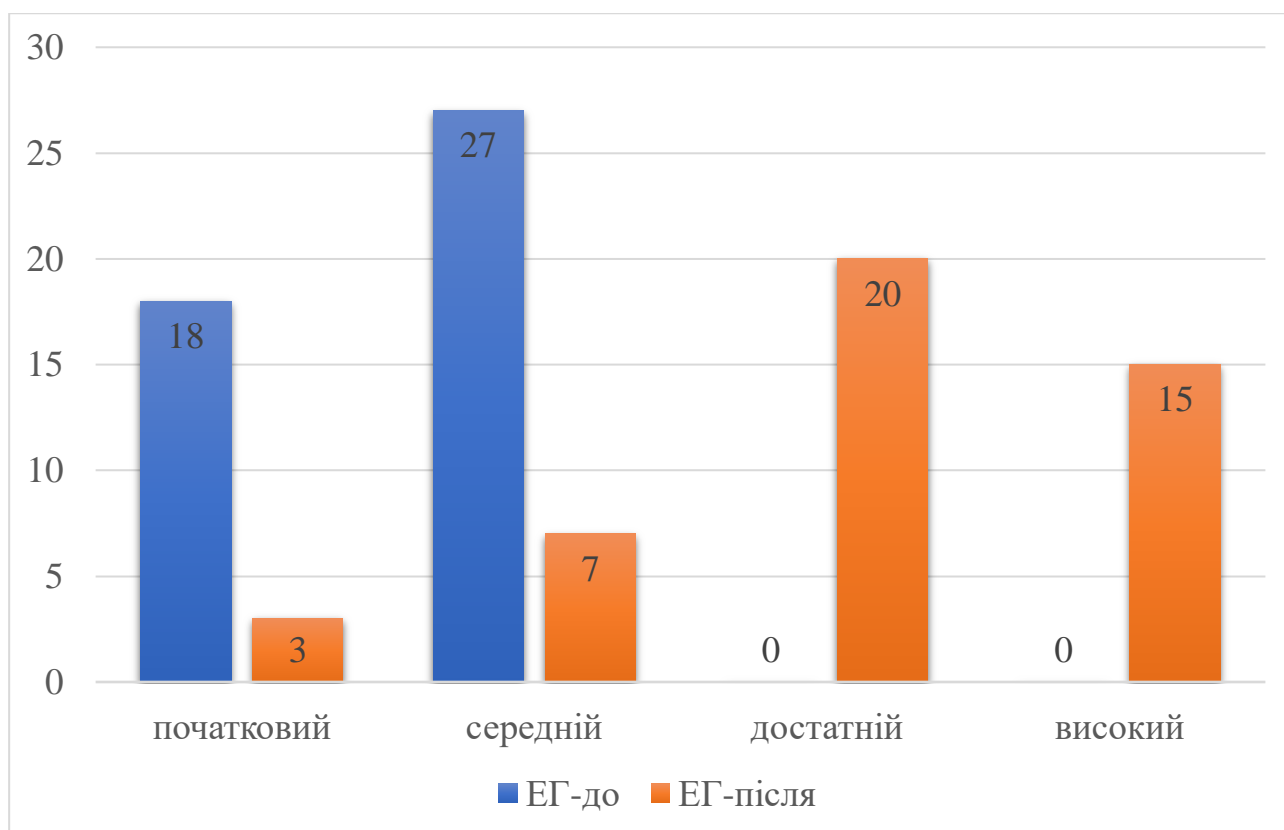


Рис. 2.27. Динаміка зміни рівнів сформованості практичних навичок та загальних компетенцій

Результати експериментального впровадження розробленої методики навчання основ квантової інформатики у вигляді факультативного курсу інтегрованого змісту надали можливість зробити висновок про те, що масштабне упровадження основ квантової інформатики в освітній процес ліцеїв (відповідно до Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій) доцільно здійснювати за трьома моделями:

- 1) модель «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики»;
- 2) модель «Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики»;
- 3) модель «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики».

За першою моделлю – «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики» – пропедевтичне вивчення пропонується запровадити в межах програми рівня стандарту обов'язково-вибіркового курсу «Інформатика» для 10 (11) класів обсягом 17 навчальних годин, що повністю відповідає програмі

авторського факультативного курсу. Таким чином, з'являється ще одна альтернатива для досить поширеного варіанту вивчення інформатики у профільній (старшій) школі за програмою рівня стандарту – по 1,5 навчальні години інформатики у 10 та 11 класах (обсяг навчальних годин на два роки – 70), що обмежувався обов'язковим вивченням базового модуля (35 навчальних годин), двох 17-годинних (однозначно «Основи електронного документообігу» та «Інформаційна безпека») вибіркових модулів й одного 35-годинного вибіркового модуля («Веб-технології», «Бази даних» тощо).

«Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики» (за другою моделлю упровадження) 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 (додаток А, рис. А.1);
- оптичні технології (додаток А, рис. А.2, А.3);
- обладнання для квантових комп'ютерів та датчиків (додаток А, рис. А.4);
- інфраструктура квантової комунікації (додаток А, рис. А.7).

На уроках математики – алгебри – (за програмою рівня стандарту) в межах експериментального наскрізного розділу з проєктною назвою «Фізико-математичні основи програмування на квантових комп'ютерах» 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 (додаток А, рис. А.1).

На уроках інформатики в межах названого експериментального наскрізного розділу залишиться зосередити увагу учнів на таких питаннях:

- використання апаратних платформ для квантових обчислень (додаток А, рис. А.4);
- квантові обчислення та моделювання (додаток А, рис. А.5);
- сфери застосування квантових датчиків (додаток А, рис. А.6);
- класична криптографія та квантова комунікація (додаток А, рис. А.7, А.8).

За третьою моделлю – «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики» – інваріанте (обов'язкове) пропедевтичне вивчення, більш ґрунтовне (у порівнянні з першими двома моделями) пропонується обсягом 35 навчальних годин для класів інформаційно-технологічного профілю за рахунок збільшення годин на вивчення питань суто інформатичного змісту (додаток А, рис. А.4-А.7), або ж опанування основ квантової інформатики паралельно на різних платформах для квантових обчислень.

Для класів же математичного, фізичного або фізико-математичного профілів (чи інших профілів природничо-математичного напрямку) даний інтегрований курс «Основи квантової інформатики» може бути рекомендований як курс за вибором.

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.

Висновки до розділу 2

Розроблена модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв складається із таких взаємопов'язаних блоків – цільового (компоненти якого визначають мету формування визначеної системи компетентностей), змістового (компоненти якого відображають основні напрями змісту формування компетентностей з основ квантової інформатики), технологічного (компонентами якого є засоби та платформи навчання квантової інформатики, взаємопов'язані з методами навчання інформатики та формами

організації навчальної діяльності учнів з інформатики) та результативного (компоненти якого репрезентують прогнозований результат застосування моделі).

Компонентами моделі, що забезпечують взаємозв'язок усіх блоків, є компетентнісний, системний, інтеграційний та особистісно-діяльнісний методологічні підходи та загальнодидактичні принципи навчання інформатики.

Реалізацію побудованої моделі формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв здійснено в межах факультативного курсу «Основи квантової інформатики», орієнтованого на учнів 10 (11) класів; програму факультативу складено на основі структури та змісту системи компетентностей з основ квантової інформатики з урахуванням результатів експертного опитування; врахувавши критерії добору інструментальних засобів навчання окремих розділів інформатики, основним засобом навчання основ квантової інформатики учнів ліцею обрано платформу IBM Quantum; загальний обсяг годин для очного (очно-дистанційного або синхронного дистанційного) навчання за програмою факультативу становить 17 годин, а значить може бути рекомендований в якості вибіркового модуля програми з інформатики рівня стандарту для учнів 10 (11) класів.

Експериментальна перевірка розробленої методики у формі послідовного педагогічного експерименту та статистика отриманих даних підтвердили гіпотезу дослідження.

Основні результати, отримані у розділі 2, опубліковані у [28; 109; 110].

ВИСНОВКИ

Отримані результати дослідження дають підстави зробити такі **висновки**.

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування й запропоновано методику навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

1. За результатами аналізу наукової літератури, нормативно-законодавчих документів з'ясовано, що: квантові інформаційні технології у країнах-лідерах технологічного та соціально-економічного розвитку (США, Китай, країни ЄС) визнаються стратегічно важливим міждисциплінарним напрямом, попит на фахівців з якого стрімко зростатиме; Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій, започаткована 2021 року, передбачає навчання квантової інформатики на всіх рівнях освіти, розпочинаючи з початкової школи, що на сьогодні реалізується насамперед за рахунок програм неформальної освіти (окремі курси, майстер-класи, семінари, літні табори та школи); ключові компоненти методичної системи навчання інформатики (а саме цілі, зміст та засоби навчання) потребують уточнення для забезпечення можливості систематизовано навчати основ квантової інформатики учнів ліцеїв, поєднуючи концептуальне та інтуїтивне розуміння концепцій квантової фізики та фізичних основ квантових технологій із методично адаптованими науковими засадами квантових обчислень та моделювання.

2. Ґрунтуючись на фундаментальних ідеях компетентнісного підходу у навчанні, а також взявши за основу структуру та зміст Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій, визначено ключове поняття дослідження – 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; частинними компетентностями (групами компетентностей) системи 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.

3. Розроблена модель формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв складається із таких взаємопов'язаних блоків – цільового (компоненти якого визначають мету формування визначеної системи компетентностей), змістового (компоненти якого відображають основні напрями змісту формування компетентностей з основ квантової інформатики), технологічного (компонентами якого є засоби та платформи навчання квантової інформатики, взаємопов'язані з методами навчання інформатики та формами організації навчальної діяльності учнів з інформатики) та результативного (компоненти якого репрезентують прогнозований результат застосування моделі).

Компонентами моделі, що забезпечують взаємозв'язок усіх блоків, є системний, компетентнісний, інтеграційний та особистісно-діяльнісний методологічні підходи та загальнодидактичні принципи навчання інформатики.

4. Реалізацію побудованої моделі формування компетентностей із основ квантової інформатики учнів ліцеїв здійснено в межах факультативного курсу «Основи квантової інформатики», орієнтованого на учнів 10 (11) класів; програму факультативу складено на основі структури та змісту системи компетентностей з основ квантової інформатики з урахуванням результатів експертного опитування; врахувавши критерії добору інструментальних засобів навчання окремих розділів інформатики, основним засобом навчання основ квантової інформатики учнів ліцею обрано платформу IBM Quantum; загальний обсяг для очного (очно-дистанційного або синхронного дистанційного) навчання за програмою факультативу становить 17 годин, а значить може бути рекомендований в якості вибіркового модуля програми з інформатики рівня стандарту для учнів 10 (11) класів.

Беручи до уваги інтегрованість змісту квантової інформатики – квантова механіка (фізика), квантова теорія інформації, квантова теорія алгоритмів,

пропонується три моделі масштабного упровадження методики навчання основ квантової інформатики в освітній процес ліцеїв:

- 1) модель «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики»;
- 2) модель «Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики»;
- 3) модель «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики».

За першою моделлю – «Вибірковий модуль «Основи квантової інформатики» – пропедевтичне вивчення пропонується запровадити в межах програми рівня стандарту обов'язково-вибіркового курсу «Інформатика» для 10 (11) класів обсягом 17 навчальних годин, що повністю відповідає програмі авторського факультативного курсу. Таким чином, з'являється ще одна альтернатива для досить поширеного варіанту вивчення інформатики у профільній (старшій) школі за програмою рівня стандарту – по 1,5 навчальні години інформатики у 10 та 11 класах (обсяг навчальних годин на два роки – 70), що обмежувався обов'язковим вивчення базового модуля (35 навчальних годин), двох 17-годинних (однозначно «Основи електронного документообігу» та «Інформаційна безпека») вибіркового модулів й одного 35-годинного вибіркового модуля («Веб-технології», «Бази даних» тощо).

«Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики» (за другою моделлю упровадження) 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 проєктною назвою «Фізико-математичні основи програмування на квантових комп'ютерах».

За третьою моделлю – «Інтегрований курс «Основи квантової інформатики» – інваріанте (обов'язкове) пропедевтичне вивчення, більш ґрунтовне (у порівнянні з першими двома моделями) пропонується обсягом 35 навчальних годин для класів інформаційно-технологічного профілю. Для класів же математичного, фізичного або фізико-математичного профілів (чи інших профілів природничо-математичного напрямку) даний інтегрований курс може бути рекомендований як курс за вибором.

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. 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 аналізованої проблеми. Подальші наукові пошуки її розв'язання доцільні за такими напрямками: проєктування частинних методик формування компетентностей у галузі квантових технологій відповідно до Європейської рамки; інтегроване навчання квантової фізики та інформатики учнів наукових ліцеїв; застосування засобів імерсивного середовища для розробки віртуальних маніпулятивів квантових технологій; розробка методики навчання основ квантових технологій учнів професійних ліцеїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. About us | InfWeb // The University of Edinburgh. – 2020. – Access mode : <https://web.inf.ed.ac.uk/quantum-informatics/about-us>
2. Austria, Bulgaria, Denmark and Romania join initiative to explore quantum communication for Europe // Shaping Europe’s digital future. – 2020. – Access mode : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/austria-bulgaria-denmark-and-romania-join-initiative-explore-quantum-communication-europe>
3. Berman G. P. Solid-State Quantum Computer Based on Scanning Tunneling Microscopy / G. P. Berman, G. W. Brown, M. E. Hawley, V. I. Tsifrinovich // Physical Review Letters. – 2001. – Vol. 87, no. 9. – Article 097902. – DOI : 10.1103/physrevlett.87.097902
4. Chen S. China building world’s biggest quantum research facility / Stephen Chen // South China Morning Post. – 2017. – Access mode : <https://www.scmp.com/news/china/society/article/2110563/china-building-worlds-biggest-quantum-research-facility>
5. Contact IBM Quantum. – [2020?]. – Access mode : <https://www.ibm.com/it-infrastructure/us-en/resources/campaignmail/quantum-computing/contact/>
6. Council Recommendation of 22 May 2018 on key competences for lifelong learning (Text with EEA relevance) / The Council of the European Union // Official Journal of the European Union. – C 189. – P. C1-13. – 4.6.2018. – Access mode : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.C_.2018.189.01.0001.01.ENG&toc=OJ:C:2018:189:TOC
7. Dubbers D. Quantum Informatics / Dirk Dubbers, Hans-Jürgen Stöckmann // Quantum Physics: The Bottom-Up Approach. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – P. 159-164. – (Graduate Texts in Physics). – DOI : 10.1007/978-3-642-31060-7_15.
8. Economou S. Teaching quantum information science to high-school and early undergraduate students / Sophia E. Economou, Terry Rudolph, Edwin Barnes. –

- arXiv:2005.07874. – 2020. – Access mode : <https://arxiv.org/abs/2005.07874>
9. Educational resources / Google Quantum AI. – [2021?]. – Access mode : <https://quantumai.google/education>
 10. Educators program // IBM Quantum. – [2021?]. – Access mode : <https://quantum-computing.ibm.com/programs/educators>
 11. eLearning Courses // SheQuantum. – 2020. – Access mode : <https://shequantum.org/elearning/>
 12. Encyclopedia of Sciences of Learning / Editor : Norbert M. Seel. – New York : Springer, 2012. – 3536 p.
 13. Future Skills for the 2020s. – 2020. – 235 p. – Access mode : <https://api.worldskills.org/resources/download/12832/14248/15165?l=en>
 14. Future Skills. Technical description. Quantum Technology / Worldskills Kazan 2019. – 2018. – Access mode : <https://api.worldskills.org/resources/download/9376/10348/11266?l=en&tkn=3c31a02b-5f39-4152-83d2-96f5128e45ef>
 15. Future Skills. Test Project Quantum Technology. – 2018. – Access mode : <https://api.worldskills.org/resources/download/11111/12211/13131?l=en&tkn=f1978d13-f687-4466-88f2-255937e9812b>
 16. Get started with Quantum Inspire // Quantum Inspire – By QuTech. – 2021. – Access mode : <https://www.quantum-inspire.com/features>
 17. Greinert F. Competence Framework for Quantum Technology. Version 1.0 (May 2021) / Franziska Greinert, Rainer Müller. – 2021. – Access mode : https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence_Framework_for_QT_1.0_May2021.pdf
 18. Hartnett K. A New Law to Describe Quantum Computing’s Rise? / Kevin Hartnett // Quanta Magazine. – 2019. – Access mode : <https://www.quantamagazine.org/does-nevins-law-describe-quantum-computings-rise-20190618/>
 19. Hilton J. Council Post: Building The Quantum Workforce Of The Future / Jeremy Hilton // Forbes. – Access mode :

- <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2019/06/19/building-the-quantum-workforce-of-the-future>
20. IBM Quantum // IBM Quantum. – [2021?]. – Access mode : <https://quantum-computing.ibm.com/>
 21. IBM Quantum Services // IBM Quantum. – [2021?]. – Access mode : <https://quantum-computing.ibm.com/services?services=systems>
 22. International Technology Roadmap for Semiconductors 2009 Edition Assembly and Packaging. – 2009. – Access mode : <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/09/Assembly-Packaging.pdf>
 23. Introduction to Quantum Computing – MasterClass. – 2021. – Access mode : <https://web.archive.org/web/20210930234116/https://ubcxonline.exl.ubc.ca/courses/course-v1:UBCx+QuantumComputing1+2020/about>
 24. Jobbörse Indeed.com | Deutschlands Jobsuche. – 2021. – Access mode : <https://de.indeed.com/>
 25. Jobsuche - Millionen von Jobs in Ihrer Nähe | ZipRecruiter. – [2021?]. – Access mode : <https://www.ziprecruiter.com/Jobs/Quantum-Software-Engineer>
 26. Katz I. R. Assessing Information and Communications Technology Literacy for Higher Education / Irvin R. Katz, D. M. Williamson, H. L. Nadelman, I. Kirsch, Russell Almond, P. L. Cooper, M. L. Redman, Diego Zapata-Rivera // The Annual Meeting of the International Association for Educational Assessment, Philadelphia, PA. – 2004. – Access mode : https://www.researchgate.net/publication/245507800_Assessing_Information_and_Communications_Technology_Literacy_for_Higher_Education
 27. Key Concepts for Future QIS Learners. – 2020. – 5 p. – Access mode : <https://files.webservices.illinois.edu/9156/keyconceptsforfutureqislearners5-20.pdf>
 28. Lehka L. V. Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to lyceums students / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Educational Dimension. – 2021. – Issue 4 (56). – P. 102-121. – DOI : 10.31812/educdim.v56i4.4440.

29. Lehka L. V. Quantum programming is a promising direction of IT development / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Computer Science & Software Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018), Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018 / Edited by : Arnold E. Kiv, Serhiy O. Semerikov, Vladimir N. Soloviev, Andrii M. Striuk // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2292. – P. 76-82. – Access mode : <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper07.pdf>
30. Mandelbaum R. Five years ago today, we put the first quantum computer on the cloud. Here's how we did it / Ryan Mandelbaum. – 2021. – Access mode : <https://research.ibm.com/blog/quantum-five-years>
31. Ménard A. A game plan for quantum computing / Alexandre Ménard, Ivan Ostojic, Mark Patel, Daniel Volz. – 2020. – Access mode : <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/a-game-plan-for-quantum-computing>
32. Microsoft Quantum overview | Microsoft Azure // Cloud Computing Services | Microsoft Azure / Microsoft. – 2021. – Access mode : <https://azure.microsoft.com/solutions/quantum-computing/>
33. Moore G. E. Gramming more components onto integrated circuits / Gordon E. Moore // Electronics. – 1965. – Vol. 38. – Number 8. – Access mode : <https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/moores-law-electronics.pdf>
34. Moore G. E. No exponential is forever: but "Forever" can be delayed! [semiconductor industry] / Gordon E. Moore // 2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. – 2003. – Vol. 1. – P. 20-23. – DOI : 10.1109/ISSCC.2003.1234194
35. Moore G. E. Progress In Digital Integrated Electronics / Gordon E. Moore // Technical Digest 1975. International Electron Devices Meeting. – IEEE, 1975. – P. 11-13. – Access mode : https://www.eng.auburn.edu/~agrawvd/COURSE/E7770_Spr07/READ/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf

36. National Q-12 Education Partnership. Q2WORK. – [2021?]. – Access mode : <https://q12education.org/about>
37. National Quantum Initiative Act // Congress.gov | Library of Congress. – 2018. – Access mode : <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>
38. Open-Source Quantum Development // Qiskit. – [2021?]. – Access mode : <https://qiskit.org/>
39. Panetta K. 5 Trends Drive the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020 / Kasey Panetta. – 2021. – Access mode : <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/>
40. Q2Work: Supporting learners and educators to develop a competitive workforce in quantum information science and technology. – National Science Foundation, 2020. – Access mode : https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2039745
41. Quantum Computing // Brilliant. – [2021?]. – Access mode : <https://brilliant.org/courses/quantum-computing/>
42. Quantum computing foundations // Microsoft. – 2021. – Access mode : <https://docs.microsoft.com/en-us/learn/paths/quantum-computing-fundamentals/>
43. Quantum Computing Service–Amazon Braket–Amazon Web Services // Amazon Web Services, Inc. – 2021. – Access mode : <https://aws.amazon.com/braket>
44. Quantum Development Kit - Quantum Programming | Microsoft Azure // Cloud Computing Services | Microsoft Azure / Microsoft. – 2021. – Access mode : <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/development-kit/quantum-computing>
45. Quantum for Business // IBM. – [2021?]. – Access mode : <https://www.ibm.com/quantum-computing/business/>
46. Quantum Lab - DAMO Academy / Alibaba. – 2018. – Access mode :

- <https://damo.alibaba.com/labs/quantum>
47. Quantum Technology / WorldSkills International. – 2017. – Access mode : <https://worldskills2019.com/en/projects/future-skills-2019/skills/quantum-technology/index.html>
 48. Quantum Technology | The future is Quantum // Quantum Flagship. – [2021?]. – Access mode : <https://qt.eu/>
 49. QubitxQubit // The Coding School. – 2021. – Access mode : <https://www.qubitbyqubit.org>
 50. Resource Library | D-Wave // D-Wave Systems Inc. – 2021. – Access mode : <https://www.dwavesys.com/learn/resource-library/>
 51. The basics of Quantum Computing // Quantum Inspire – By QuTech. – 2021. – Access mode : <https://www.quantum-inspire.com/kbase/introduction-to-quantum-computing>
 52. UNESCO ICT Competency Framework for Teachers. Version 3 / UNESCO. – Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018. – 68 p. – Access mode : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265721>
 53. Universities With Research Groups - Quantum Computing Report // Quantum Computing Report. – 2021. – Access mode : <https://quantumcomputingreport.com/universities/>
 54. Wang Y. Quantum Computation and Quantum Information / Yazhen Wang // Statistical Science. – 2021. – 27(3). – P. 373-394. – Access mode : <http://www.jstor.org/stable/41714771>.
 55. WG1: QT educational initiatives in primary and secondary schools and public outreach / Quantum Flagship. Quantum Technologies Education Coordination and Support Action (QTEdu CSA). – 2021. – 42 p. – Access mode https://drive.google.com/file/d/14mt_X2xA5smT3_kYZSiXqdWpevRILY6W/view
 56. Yoon S. 17 technology predictions for 2025 / Saemoon Yoon // World Economic Forum. – 2020. – Access mode : <https://www.weforum.org/agenda/2020/06/17-predictions-for-our-world-in-2025/>

57. Адамян В. М. Робоча програма навчальної дисципліни «Квантова інформатика» / Адамян В. М., Завальнюк В. В. – Одеса, Одеський національний університет імені І. І. Мечнікова, 2020. – Режим доступу : http://phys.onu.edu.ua/pub/Робочі_програми/Квантова_інформатика_2020.pdf
58. Аналітична доповідь до щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України «Про внутрішнє та зовнішнє становище України» / Національний інститут стратегічних досліджень. – 2020. – 58 с. – Режим доступу : <https://niss.gov.ua/publikacii/poslannya-prezidenta-ukraini/analitichna-dopovid-do-schorichnogo-poslannya-prezidenta-4>
59. Андрущенко В. П. Філософський словник соціальних термінів / В. П. Андрущенко. – Харків : Р. И. Ф., 2005. – 672 с.
60. Антонченко М. О. Інформаційна культура як складова загальнолюдської культури / М. О. Антонченко // Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова : [збірник наукових праць]. Серія 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. Вип. 1(8) / Міністерство освіти і науки України, Нац. пед. ун-т ім. М. П. Драгоманова; редкол. В. П. Андрущенко. – Київ : Вид-во НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2004. – С. 160-168. – (До 170-ліття Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова). – Режим доступу : https://fi.npu.edu.ua/files/Zbirnik_KOSN/2/25.pdf
61. Базурін В. М. Середовища програмування як засіб навчання учнів основ програмування / В. М. Базурін // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2017. – Т. 59, вип. 3. – С. 13-27. – DOI : 10.33407/itlt.v59i3.1601
62. Барболіна Т. М. Шкільний курс інформатики та методика його викладання : навчальний посібник / Барболіна Т. М. – Полтава, 2007. – Ч. 1. Загальна методика. – 128 с. – Режим доступу : <http://dspace.pnpu.edu.ua/bitstream/123456789/3982/1/Barbolina1.pdf>
63. Баштовой В. И. Использование мысленного эксперимента как средства изучения квантовой физики в общеобразовательных учебных заведениях :

- дис. ... к. пед. н. : 13.00.02 / Баштовой Владимир Иванович ; Украинский государственный педагогический университет, 1995.
64. Бершадский М. Е. Методика формирования теоретических обобщений квантовой механики у учащихся средней профильной школы : автореферат дис. ... кандидата педагогических наук : 13.00.02 – методика преподавания физики / Бершадский Михаил Евгеньевич ; Московский ордена Трудового Красного Знамени педагогический университет. – Москва, 1993. – 17 с. – Режим доступа : http://irbis.gnpbu.ru/Aref_1993/Beshadskiy_M_E_1993.pdf
65. Беспалов П. В. Акмеологический подход к формированию и развитию информационно-технологической компетентности государственных служащих / Беспалов Павел Васильевич // Материалы конференции «Информационные технологии в образовании-2003». – Режим доступа : <https://web.archive.org/web/20200114095600/http://ito.edu.ru/2003/II/3/II-3-2414.html>
66. Биков В. Ю. Моделі організаційних систем відкритої освіти / В. Ю. Биков. – Київ : Атіка, 2009. – 684 с.
67. Бібік Н. Переваги і ризики запровадження компетентнісного підходу в шкільній освіті / Н. Бібік // Гірська школа Українських Карпат. – 2013. – № 8-9. – С. 26-30. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/gsuc_2013_8-9_12
68. Богачик М. С. Розвиток інформатичної компетентності старшокласників загальноосвітніх навчальних закладів у процесі навчання гуманітарних предметів : автореферат дис. ... канд. пед. наук : 13.00.09 – теорія навчання / Богачик Марина Сергіївна ; Тернопільській національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. – Тернопіль, 2013. – 25 с. – Режим доступа : <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/3303>
69. Болеста І. М. Програма вивчення навчальної дисципліни “Квантові комп’ютери та квантові обчислення” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки магістрів зі спеціальності 122 «Комп’ютерні науки та інформаційні технології». – Львів : Львівський

- національний університет імені Івана Франка, 2016. – Режим доступу : https://electronics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Prog_KKKO-.pdf.
70. Бондаренко О. О. Інформатика. Рівень стандарту : підручник для 10 (11) кл. закл. загал. серед. освіти / О. О. Бондаренко, В. В. Ластовецький, О. П. Пилипчук, Є. А. Шестопапов – Харків : Ранок, 2018.
71. Бочкин А. И. Методика преподавания информатики : учеб. пособие / А. И. Бочкин. – Минск : Выш. шк., 1998. – 431 с.
72. Вакалюк Т. А. Основні характеристики хмаро орієнтованого навчального середовища для підготовки бакалаврів інформатики / Вакалюк Т. А. // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2019. – Вип. 19 (26). – С. 154–157. – Режим доступу : <https://sj.npu.edu.ua/index.php/kosn/article/view/28>
73. Вакалюк Т. А. Структурно-функціональна модель хмаро орієнтованого навчального середовища для підготовки бакалаврів інформатики / Т. А. Вакалюк // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2017. – Т. 59, вип. 3. – С. 51-61. – DOI : 10.33407/itlt.v59i3.1674
74. Великий тлумачний словник сучасної української мови (з дод. і допов.) / Уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. – К. ; Ірпінь : Перун, 2005. – 1728 с.
75. Верлань А. Ф. Основы информатики и вычислительной техники : метод. пособие / А. Ф. Верлань, В. Н. Касаткин, И. Ф. Тесленко ; Межвед. совет «Наука – нар. образованию» при Президиуме АН УССР, М-во просвещения УССР. – Киев : Рад. шк., 1986. – 55 с.
76. Ворожбит А. В. Використання веб-орієнтованих технологій у навчанні інформатики в закладах загальної середньої освіти : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.02 – теорія та методика навчання (інформатика) / Ворожбит Алла Володимирівна ; Міністерство освіти і науки України, Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова. – Київ, 2019. – 302 с.
77. Глушков О. В. Силабус навчальної дисципліни «Математичні основи квантового комп'ютингу» / Глушков О. В., Хецеліус О. Ю., Свинаренко А. А., Буяджи В. В. – Одеса : Одеський державний

- екологічний університет, 2020. – Режим доступу : <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/7710/>
78. Гнатенко Х. Квантові комп'ютери: сьогодення та майбутнє / Христина Гнатенко // Колосок. – 2020. – № 5. – С. 2-7. – Режим доступу : <https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-kvantovi-komp-iutery-s-ohodennia-ta-maybutnie/>
79. Гнатенко Х. Неймовірне у квантовому світі / Христина Гнатенко // Колосок. – 2020. – № 4. – С. 2-7. – Режим доступу : <https://e-kolosok.org/khrystyna-hnatenko-neymovirne-u-kvantovomu-sviti/>
80. Головань М. С. Інформатична компетентність як об'єкт педагогічного дослідження / М. С. Головань // Проблеми інженерно-педагогічної освіти. – 2007. – № 16. – С. 314-324.
81. Гончаренко С. У. Наука й навчальний предмет / Семен Гончаренко // Шлях освіти. – 2006. – № 1. – С. 8–14. – Режим доступу : <https://core.ac.uk/reader/84274193>
82. Горда І. М. Формування інформаційно-комп'ютерної компетентності студентів вищих аграрних навчальних закладів // Новітні інформаційно-комунікаційні технології в освіті : матеріали III Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції молодих учених та студентів (Полтава, 18-19 листопада 2015 р.). – Полтава : ФОП Болотін А. В., 2015. – С. 97-99.
83. Гуржій А. М. Інформатизації і комп'ютеризації загальноосвітніх навчальних закладів України – 20 років / Гуржій А. М., Биков В. Ю., Гапон В. В., Плєскач М. Я. – Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2005. – № 5. – С. 10.
84. Денежніков С. Вплив NBIC-конвергенції технологій на еволюцію антропосоціогенезу: виклики сучасності / Сергій Сергійович Денежніков // Світогляд – Філософія – Релігія. – 2012. – Вип. 2. – С. 15-24. – Режим доступу : <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/40679>
85. Енциклопедія освіти / Акад. пед. наук України ; гол. ред. В. Г. Кремень. – К. : Юрінком Інтер, 2008. –1040 с.

86. Жалдак М. И. Основы информатики и вычислительной техники / М. И. Жалдак, Н. В. Морзе. – Киев : Вища школа, 1986. – 199 с.
87. Жалдак М. І. 20 років становлення і розвитку методичної системи навчання інформатики в школі та педагогічному університеті / М. І. Жалдак, Н. В. Морзе, Ю. С. Рамський // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2006. – Вип. 4 (11). – С. 3-13. – Режим доступу : <https://sj.npu.edu.ua/index.php/kosn/article/view/585>
88. Жалдак М. І. Програмування на мікрокалькуляторах : посібник для самоосвіти вчителів / М. І. Жалдак, Ю. С. Рамський . – Київ : Радянська школа, 1985. – 226 с.
89. Жалдак М. І. Шкільній інформатиці – 25! / М. І. Жалдак, Ю. С. Рамський // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2010. – Вип. 8 (15). – С. 3-19. – Режим доступу : <https://sj.npu.edu.ua/index.php/kosn/article/view/290>
90. Завадський І. О. Календарне планування з інформатики для 2-11 класів, курсів за вибором на 2020-2021 навчальний рік. – Режим доступу : https://docs.google.com/spreadsheets/d/1H_8heCLJ2ggpVq_al38FcntsGVBhukmkYwWcPIMRNna4/edit#gid=1995812310
91. Завадський І. О. Програма для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів (12-річна школа) / Завадський І. О., Дорошенко Ю. О., Потапова Ж. В. // Інформатика. Програми для профільного навчання та до профільної підготовки. – Київ : ВНУ, 2009. – С. 369-389.
92. Изучение основ информатики и вычислительной техники : пособие для учителей / Под ред. А. П. Ершова, В. М. Монахова. – М. : Просвещение, 1985. – Ч. 1. – 191 с.
93. Інформатика : навчальна програма вибірково-обов'язкового предмету для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів (рівень стандарту). – [2017]. – Режим доступу : <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11->

klas/2018-2019/informatika-standart-10-11.docx

94. Інформатика. Програми для загальноосвітніх навчальних закладів. – Запоріжжя : Прем'єр, 2003. – 304 с.
95. Кабаканова С. Ш. Преемственность в формировании квантовых представлений у учащихся общеобразовательной школы : автореферат дис. ... кандидата педагогических наук : 13.00.02 – методика преподавания физики / Кабаканова Сана Шалобаевна ; Российская академия образования, Институт общеобразовательной школы. – Москва, 1994. – 12 с.
96. Каймин В. О преподавании курса ОИВТ по машинному варианту / В. Каймин, Н. Угринович // Информатика и образование. – 1989. – № 2. – С. 17-22.
97. Касаткин В. Н. Информация, алгоритмы, ЭВМ : пособие для учителя. – М. : Просвещение, 1991. – 191 с.
98. Квантова механіка / Рішельєвський дистанційний // YouTube. – 2021. – Режим доступу : https://youtube.com/playlist?list=PLuKEIL5ZUv-WlkkZQb0DPPTmmgQLl6_By
99. Концепція профільного навчання в старшій школі. – 2003. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v10_1290-03#Text
100. Коршунова О. В. Інформатика : підручник для 5 класу загальноосвітніх навчальних закладів / О. В. Коршунова, І. О. Завадський. – Київ : Освіта, 2018. – 144 с.
101. Костенко Л. Д. Диференційоване вивчення основ квантової фізики у середніх навчальних закладах різного профілю : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.02 – теорія і методика навчання фізики / Костенко Лариса Давидівна ; Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова, 2001. – 25 с. – Режим доступу : <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/15674>
102. Котенко В. В. Информационно-компьютерная компетентность как компонент профессиональной подготовки будущего учителя информатики / В. В. Котенко, С. Л. Сурменко // Вестник Омского государственного

- педагогического университета. – 2006. – Режим доступа : <https://web.archive.org/web/20100527104745/http://www.omsk.edu/article/vesnik-omgpu-114.pdf>
103. Котубей В. Ф. Структурно-функціональна модель формування соціокультурної компетентності майбутніх учителів початкової школи в педагогічних коледжах / В. Ф. Котубей // Фізико-математична освіта. – 2019. – Випуск 2(20). – С. 54-58. – Режим доступу : <https://repository.sspu.edu.ua/handle/123456789/7613>
104. Крысько В. Г. Психология и педагогика: Схемы и комментарии / В. Г. Крысько. – М. : Владос-Пресс, 2001. – 368 с.
105. Кузнецов А. А. Общая методика обучения информатике : учебное пособие / А. А. Кузнецов, Т. Б. Захарова, А. С. Захаров. – Москва : МПГУ, 2014. – Ч. 1. – 300 с.
106. Лапчик М. П. Теория и методика обучения информатике / под ред. М. П. Лапчика. – М. : Академия, 2008. – 584 с.
107. Лебідь О. О. Основи квантового комп'ютера та квантової інформатики : навчальний посібник / О. О. Лебідь, О. Ю. Дейнека, А. В. Рибалко, В. І. Гаращенко. – Рівне : НУВГП, 2014. – 151 с. – Режим доступу : <http://ep3.nuwm.edu.ua/2582/>
108. Легка Л. В. Основи квантових технологій у закладах загальної середньої освіти: обумовленість та забезпеченість / Л. В. Легка // Освітній дискурс. – 2021. – Випуск 35 (7). – С. 61–72. – DOI : 10.33930/ed.2019.5007.35(7)-6
109. Легка Л. В. Поточний стан і перспективи розвитку методичної системи навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти України / Людмила Легка // Збірник наукових праць здобувачів вищої освіти Криворізького державного педагогічного університету (приурочено до 90-річчя КДПУ) / Міністерство освіти і науки України, Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг, 2020. – С. 67–70.
110. Легка Л. В. Пропедевтика вивчення квантової інформатики у профільній (старшій) школі / Л. В. Легка, С. В. Шокалюк, Є. Ю. Богуненко // Фізико-

- математична освіта. – 2021. – Том 28. – № 2. – С. 51–56. – DOI : 10.31110/2413-1571-2021-028-2-009
111. Майзеліс З. О. Робоча програма навчальної дисципліни «Сучасні проблеми фізики: квантовий комп'ютер» / Майзеліс Захар Олександрович. – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2017. – Режим доступу : http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/Rob_pr_navch_dysc_2017-2018/Zag_kursy_PDFs%20for%20Site/Kvantovyy_komputer_2017-18_osv_nauk_prof.pdf
112. Малафіїк І. В. Дидактика : навчальний посібник / І. В. Малафіїк. – К. : Кондор, 2005. – 397 с. – Режим доступу : http://library.nlu.edu.ua/POLN_TEXT/KNIGI/KONDOR1/DIDAKTIKA_2005.pdf
113. Малев В. В. Общая методика преподавания информатики : учебное пособие / В. В. Малев. – Воронеж : ВГПУ, 2005. – 271 с. – Режим доступа : <http://window.edu.ru/resource/874/37874/files/index.html>
114. Методичні рекомендації щодо розроблення стандартів вищої освіти. – 2017. – Режим доступу : <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/proekty%20standartiv%20vishcha%20osvita/1648.pdf>
115. Миронова О. І. Формування інформаційної компетентності студентів як умова ефективного здійснення інформаційної діяльності / О. І. Миронова // Вісник Луганського національного університету імені Тараса Шевченка. Педагогічні науки. – 2010. – № 17 (204). – С. 165-175.
116. Морзе Н. В. Інформатика. Рівень стандарту : підручник для 10(11) кл. загальноосвіт. навч. закладів / Н. В. Морзе, О. В. Барна. – Київ : Оріон, 2018. – 240 с.
117. Морзе Н. В. Інформатика : підручник для 9 класу / Н. В. Морзе, В. П. Вембер, О. Г. Кузьмінська. – К. : Школяр, 2009. – 344 с.
118. Морзе Н. В. Методика навчання інформатики : навчальний посібник / Н. В. Морзе ; за ред. акад. М. І. Жалдака. – Київ : Навчальна книга, 2004. –

- Ч. 1 : Загальна методика навчання інформатики. – 256 с.
119. Муляр В. П. Засоби інформаційних технологій у вивченні питань квантової фізики в середній школі : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.02 – теорія і методика навчання фізики / Муляр Вадим Петрович ; Волинський державний університет імені Лесі Українки. – К., 1999. – 17 с.
 120. Навчальні програми 5-9 класів, 2017 рік. – [2017]. – Режим доступу : <https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/navchalni-programi-5-9-klas>
 121. Навчальні програми для 10-11 класів : чинні з 1 вересня 2018 року. – [2017]. – Режим доступу : <https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/navchalni-programi-dlya-10-11-klasiv>
 122. Нанoeлектроника: Наука и современность / Рішельєвський дистанційний // YouTube. – 2021. – Режим доступу : <https://youtube.com/playlist?list=PLuKEIL5ZUv-Wt4DutmgVmddaHQPSpj6uX>
 123. Немых О. А. Формирование квантовых представлений учащихся основной школы на основе идей развивающего обучения : автореферат дис. ... кандидата педагогических наук : 13.00.02 – теория и методика обучения и воспитания (физика) / Немых Ольга Анатольевна ; [Место защиты: Моск. пед. гос. ун-т]. – Москва, 2009. – 20 с.
 124. Нечипуренко П. П. Інформаційно-комунікаційні технології як засіб формування дослідницьких компетентностей старшокласників у профільному навчанні хімії : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.10 – інформаційно-комунікаційні технології в освіті / Нечипуренко Павло Павлович ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг, 2017. – 424 с.
 125. Нова українська школа : концептуальні засади реформування середньої школи / Міністерство освіти і науки України ; загальна редакція : Грищенко М. – 2016. – Режим доступу : <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska->

- shkola-compressed.pdf
126. Новиков А. М. О развитии методических систем / А. М. Новиков // Специалист. – 2006. – № 9, 10. – Режим доступа : http://www.anovikov.ru/artikle/met_sys.htm
 127. Носов В. В. Програма навчальної дисципліни «Квантові обчислення і криптографія» вибіркових компонент освітньої програми другого рівня вищої освіти 125 «Кібербезпека» (Безпека інформаційних та комунікаційних систем) / Носов В. В. – Харків : Харківський національний університет внутрішніх справ, 2018. – Режим доступу : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:dfp8EtQgggwJ:nm2.univd.edu.ua/download/107641+&cd=7&hl=en&ct=clnk&gl=ua>
 128. Ортинський В. Л. Педагогіка вищої школи : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / В. Л. Ортинський. – Київ : Центр учбової літератури, 2009. – 472 с. – Режим доступу : <https://ua1lib.org/book/2728146/09d819?id=2728146&secret=09d819>
 129. Освітньо-професійна програма бакалавра «Квантові комп'ютери та квантове програмування». – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2020. – Режим доступу : https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_bak_kvant_komp_2020.pdf
 130. Освітньо-професійна програма магістра «Квантові комп'ютери та квантове програмування». – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2021. – Режим доступу : https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_mag_kvant_comp_1.9_2021.pdf
 131. Основи стандартизації інформаційно-комунікаційних компетентностей в системі освіти України : метод. рекомендації / [В. Ю. Биков, О. В. Білоус, Ю. М. Богачков та ін.] ; за заг. ред. В. Ю. Бикова, О. М. Спіріна, О. В. Овчарук. – К. : Атіка, 2010. – 88 с.
 132. Основы информатики и вычислительной техники: Программа для средних учебных заведений. – Москва : Просвещение, 1985.
 133. П'янкоська І. В. «Компетенція» та «компетентність» як провідні поняття

- компетентнісного підходу / І. В. П'янківська // Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія : Психологія і педагогіка. – 2010. – Вип. 15. – С. 202-211. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nznuoapp_2010_15_37
134. Пасічник О. В. Календарне планування з інформатики 2-11 клас 2021-2022 навчальний рік / Оксана Пасічник. – [2021?]. – Режим доступу : https://docs.google.com/spreadsheets/d/10XZJVC92cC7qgEW4F6PFcZXkKjOlyuFoDSBPxhN_vYI/edit?amp;usp=sharing#gid=0
135. Педагогіка / Под ред. Ю. К. Бабанського. – М. : Просвещение, 1983. – 607 с.
136. Пінкевич І. П. Освітньо-наукова програма «Квантові комп'ютери, обчислення та інформація» на здобуття освітнього ступеню: магістр за спеціальністю №104 «Фізика та астрономія» / Пінкевич І. П., Дмитрук І. М, Єщенко О. А., Кравченко В. М. – Київ: Київський національний університет імені Т. Г. Шевченка, 2018. – Режим доступу : https://www.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/onp_magistry_kvant_komp_obch_inf_last_03_12_2018.pdf
137. Пометун О. І. Компетентнісно орієнтована методика навчання історії в основній школі : методичний посібник / О. І. Пометун, Н. М. Гупан, В. С. Власов. – К. : КОНВІ ПРІНТ, 2018. – 208 с. – Режим доступу : <https://lib.iitta.gov.ua/712706/1/Пометун%20О.І.%20Компетентнісно%20орієнтована%20методика%20навчання%20історії.pdf>
138. Пономарева Н. С. Комп'ютерно-орієнтована методична система навчання інформатичних дисциплін майбутніх учителів математики : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.10 – інформаційно-комунікаційні технології в освіті / Пономарева Надія Сергіївна ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг, 2021. – 300 с.
139. Пономарьов О. Г. Квантові технології в комп'ютерній техніці : силабус навчальної дисципліни / Пономарьов О. Г. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – Режим доступу :

- https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/images/PDF_documents/CLBS/3.pdf
140. Про авторське право і суміжні права : Закон України № 3792-ХІІ // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 1993. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/3792-12>
 141. Про деякі питання державних стандартів повної загальної середньої освіти : Постанова Кабінету Міністрів України; Стандарт, Вимоги № 898 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2020. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/898-2020-%D0%BF>
 142. Про застосування та скасування персональних спеціальних економічних та інших обмежувальних заходів (санкцій) : Рішення РНБО // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2018. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/n0006525-18>
 143. Про затвердження Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти : Постанова Каб. Міністрів України № 24. – 2004. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/24-2004-п#Text>
 144. Про затвердження Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти : Постанова Каб. Міністрів України № 1392. – 2011. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1392-2011-п#Text>
 145. Про затвердження Державного стандарту початкової освіти : Постанова Кабінету Міністрів України; Стандарт, Вимоги, План № 87 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2018. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/87-2018-%D0%BF>
 146. Про затвердження положень з питань розповсюдження примірників аудіовізуальних творів, фонограм, відеограм, комп'ютерних програм, баз даних : Постанова Кабінету Міністрів України; Положення, Перелік № 1555 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2000. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/1555-2000-%D0%BF>
 147. Про затвердження Типових навчальних програм для загальноосвітніх навчальних закладів ІІІ ступеню : наказ № 834 / Міністерство освіти і науки України. – 2010. – Режим доступу :

- <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/plany/nmon834270820102905201465711.doc>
148. Про Національну стратегію розвитку освіти в Україні на період до 2021 року : Указ Президента України; Стратегія № 344/2013 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2013. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/344/2013>
 149. Про освіту : Закон України № 2145-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2017. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/2145-19>
 150. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 28 квітня 2017 року «Про застосування персональних спеціальних економічних та інших обмежувальних заходів (санкцій)» : Указ Президента України № 133/2017 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2017. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/133/2017>
 151. Про схвалення Концепції розвитку цифрових компетентностей та затвердження плану заходів з її реалізації : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи № 167-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – 2021. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/go/167-2021-%D1%80>
 152. Пушкарьова Т. Інформаційно-комунікаційна компетентність – важливий чинник формування світогляду учнів / Т. Пушкарьова // Рідна школа. – 2010. – № 9. – С. 9-12. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/rsh_2010_9_4
 153. Пышкало А. М. Методическая система обучения геометрии в начальной школе : авторский доклад по монографии «Методика обучения элементам геометрии в начальных классах», представленной на соискание ученой степени докт. пед. наук : 13.00.02 / А. М. Пышкало; НИИ СиМО АПН СССР. – М., 1975. – 60 с.
 154. Рамський Ю. С. Формування інформаційної культури особи – пріоритетне завдання сучасної освітньої діяльності / Ю. С. Рамський // Науковий

- часопис НПУ імені М.П. Драгоманова. Серія 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2004. – Вип. 1 (8). – С. 19–42. – Режим доступу : <https://sj.npu.edu.ua/index.php/kosn/article/view/431>
155. Ривкінд Й. Я. Інформатика (рівень стандарту) : підручник для 10(11) класів закладів загальної середньої освіти / Й. Я. Ривкінд, Т. І. Лисенко, Л. А. Чернікова, В. В. Шакотько. – Київ : Генеза, 2018. – 147 с. – Режим доступу : <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidruchnyku-10-klas-2018/18-Informatyka-10-klas/Ryvkind-Informatyka-10-11kl.pdf>
156. Ривкінд Й. Я. Інформатика 9 клас / Й. Я. Ривкінд, Т. І. Лисенко, Л. А. Чернікова, В. В. Шакотько. – Київ : Генеза, 2009. – 117 с.
157. Руденко В. Д. Інформатика (рівень стандарту) : підручник для 10(11) класів закладів загальної середньої освіти / В. Д. Руденко, Н. В. Речич, В. О. Потієнко. – Харків : Ранок, 2019. – 160 с. – Режим доступу : <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidruchnyku-10-klas-2018/18-Informatyka-10-klas/%D0%86nformatyka-riven-standartu-pidruchnyk-dlia-10-11-kl-ZZSO-Rudenko-Rechych-Potienko.pdf>
158. Руденко В. Д. Шкільна інформатика: сучасні проблеми та погляд у майбутнє / В. Д. Руденко // Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2009. – № 5. – С. 3-7. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/komp_2009_5_2
159. Семакин И. Г. Преподавание базового курса информатики в средней школе : методическое пособие / И. Семакин, Т. Шеина. – 2-е изд. , испр. и доп. – М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2004. – 540 с.
160. Семеріков С. О. Мобільне навчання: історико-технологічний вимір / С. О. Семеріков, М. І. Стрюк, Н. В. Моїсеєнко // Теорія і практика організації самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів : монографія / кол. авторів ; за ред. проф. О. А. Коновала. – Кривий Ріг : Книжкове видавництво Киреєвського, 2012. – С. 188-242.
161. Семеріков С. О. Силабус навчальної дисципліни «Квантова інформатика» / Семеріков Сергій Олексійович. – Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2020. – Режим доступу :

- https://drive.google.com/file/d/1CIRyF-tvB_R5xRMqFCsfJpmc56Kmi56m/view
162. Семеріков С. О. Силабус навчальної дисципліни «Квантове програмування» / Семеріков Сергій Олексійович. – Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2020. – Режим доступу : <https://drive.google.com/file/d/1A2GxCYPI7bnKTUoUuPMFETXVqzHkiSVN/view>
 163. Словник іншомовних слів / За ред. О. С. Мельничука. – К. : Голов. ред. УРЕ, 1974. – 938 с. – Режим доступу : <http://ev.vue.gov.ua/wp-content/uploads/2018/04/Мельничук-О.-ред.-Словник-іншомовних-слів.pdf>
 164. Словник української мови : в 11 т. / АН УРСР. Інститут мовознавства ; за ред. І. К. Білодіда. – К. : Наукова думка, 1973. – Том 4. – Режим доступу : <http://sum.in.ua/p/4/250/1>
 165. Словник української мови : в 11 т. / АН УРСР. Інститут мовознавства; за ред. І. К. Білодіда. – К. : Наукова думка, 1978. – Том 9. – Режим доступу : <http://sum.in.ua/p/9/203/2>
 166. Спірін О. М. Ключові характеристики ІКТ-компетентностей / Спірін О. М., Овчарук О. В. // Основи стандартизації інформаційно-комунікаційних компетентностей в системі освіти України : методичні рекомендації / За заг. ред. В. Ю. Бикова, О. М. Спіріна, О. В. Овчарук. – К. : Атіка, 2010. – С. 46-48.
 167. Стригунов В. І. Силабус навчальної дисципліни «Квантова біологія» / Стригунов Володимир Іванович. – Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2020. – Режим доступу : <https://drive.google.com/file/d/1IqpLLJpTRRblpA4cfCzQJI9f18TypIJV/view>
 168. Терещук С. І. Теоретико-методичні засади навчання квантової фізики в ліцеї : автореф. дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02 – теорія та методика навчання (фізика) / Терещук Сергій Іванович ; Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова. – Київ, 2020. – 40 с. – Режим доступу : <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/32133>

169. Термінологічний словник з основ підготовки наукових та науково-педагогічних кадрів післядипломної педагогічної освіти / авт. кол. : Є. Р. Чернишова, Н. В. Гузій, В. П. Ляхоцький [та ін.] ; за наук. ред. Є. Р. Чернишової ; Держ. вищ. навч. заклад «Ун-т менедж. освіти». – К. : ДВНЗ «Університет менеджменту освіти», 2014. – 230 с. – Режим доступу : https://lib.iitta.gov.ua/8301/1/словник_1%2C2.pdf
170. Тимченко И. И. Моделирование при изучении квантовой физики в средней школе : автореферат дис. ... кандидата педагогических наук : 13.00.02 / Тимченко Илья Иванович ; Моск. гос. пед. ин-т им. В. И. Ленина. – Москва, 1988. – 16 с.
171. Угринович Н. Д. Преподавание курса «Основы информатики и вычислительной техники» (машинный вариант) (Методические рекомендации) / Угринович Н. Д., Козбенко О. Ю. – Москва, 1988. – 161 с. – Режим доступа : https://drive.google.com/file/d/1mP48qKoH7aRGJfKLHDskqsKwYIUHYd1_/view
172. Холево А. С. Математические основы квантовой информатики / А. С. Холево. – Москва : МИАН, 2019. – 125 с. – (Лекц. курсы НОЦ, выпуск 30). – DOI : 10.4213/lkn30
173. Хома Т. Формування інформаційно-комунікативної компетентності студентів в умовах коледжу / Т. Хома, М. Малеш // Освітологічний дискурс. – 2018. – № 3-4. – С. 246-258. – DOI : 10.28925/2312-5829.2018.3-4.1158
174. Шевчук П. Г. Проблема вибору мови та середовища програмування в якості засобу навчання / Шевчук П. Г. // Звітна наукова конференція Інституту інформаційних технологій і засобів навчання АПН України, 25 березня 2010 року, м. Київ : матеріали наукової конференції. – К., 2010. – С. 30-31. – Режим доступу : <http://eprints.zu.edu.ua/13592/>
175. Шкиль Н. И. Изучение языков программирования в школе : пособие для учителя / Н. И. Шкиль, М. И. Жалдак, Н. В. Морзе, Ю. С. Рамский. – К. :

Радянська школа, 1988. – 272 с.

176. Яценко О. І. Критерії та показники добору середовища програмування для розвитку інформаційно-комунікаційної компетентності майбутнього вчителя початкової школи / Яценко О. І., Яценко О. С. // Актуальні питання сучасної інформатики. – 2019. – Вип. 12. – С. 105-108. – Режим доступу : <http://eprints.zu.edu.ua/31178/>
177. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 国发〔2016〕43号. – 2016. – Access mode : http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm

ДОДАТКИ

Додаток А

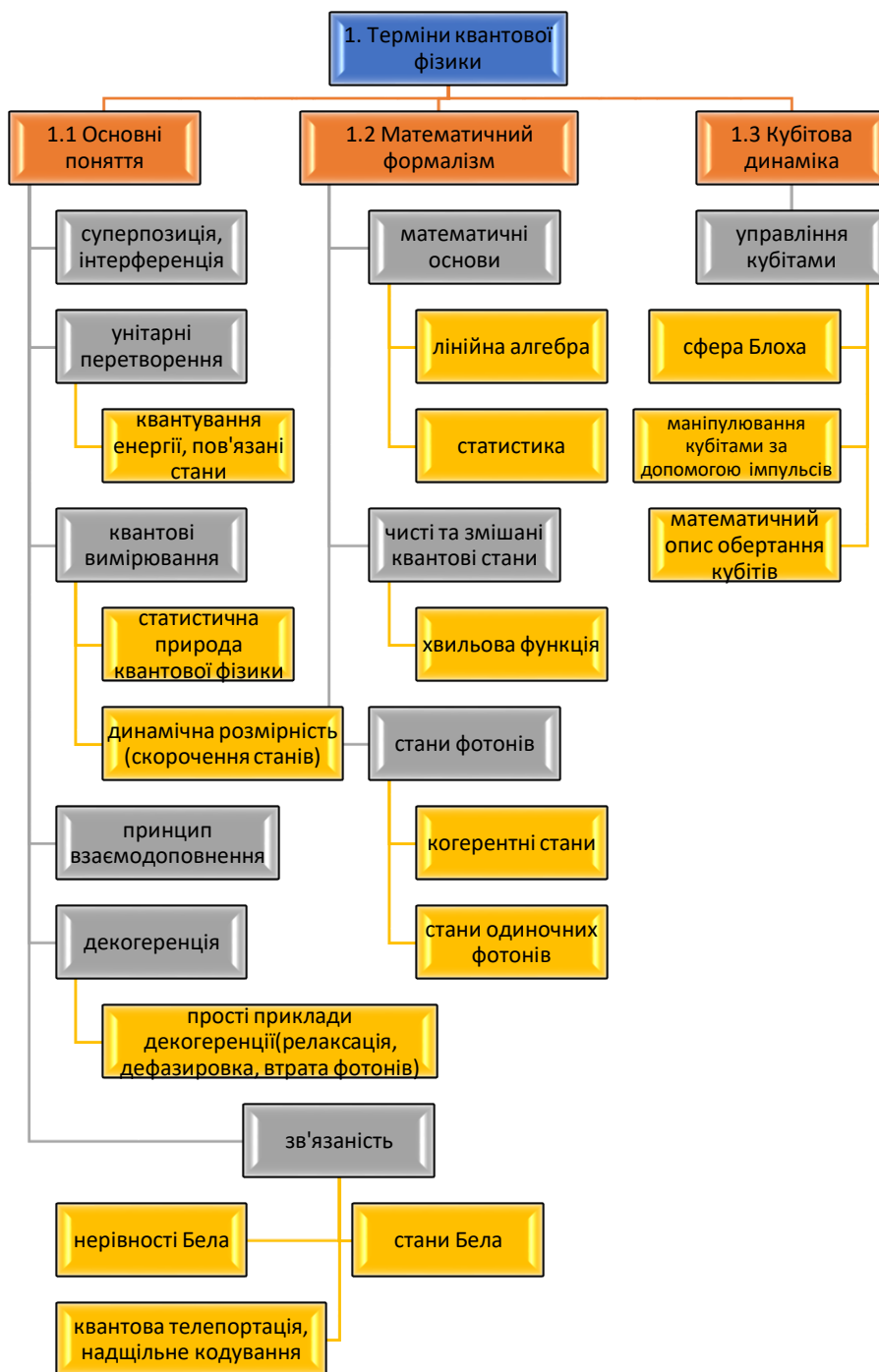
Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій
(переклад українською)

Рис. А.1. Перша група компетентностей

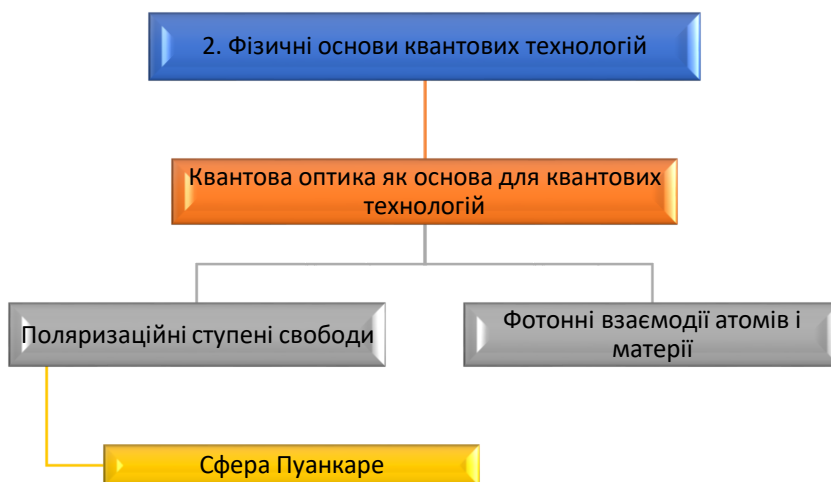


Рис. А.2. Друга група компетентностей



Рис. А.3. Третя група компетентностей

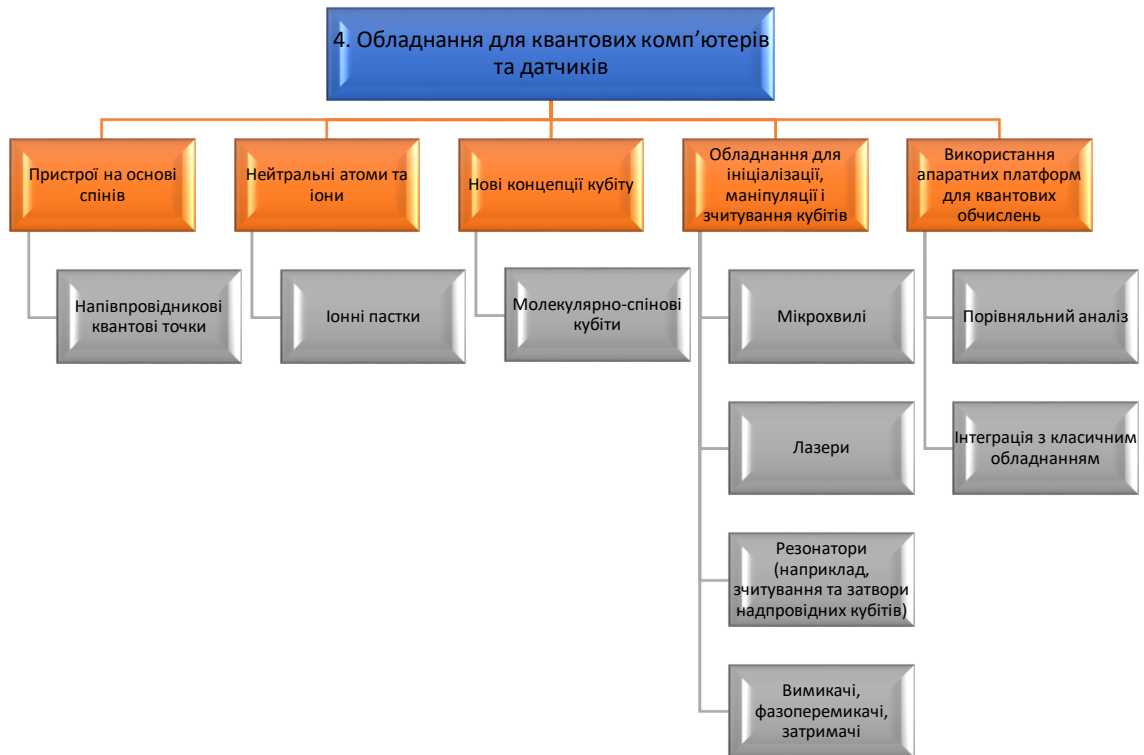


Рис. А.4. Четверта група компетентностей

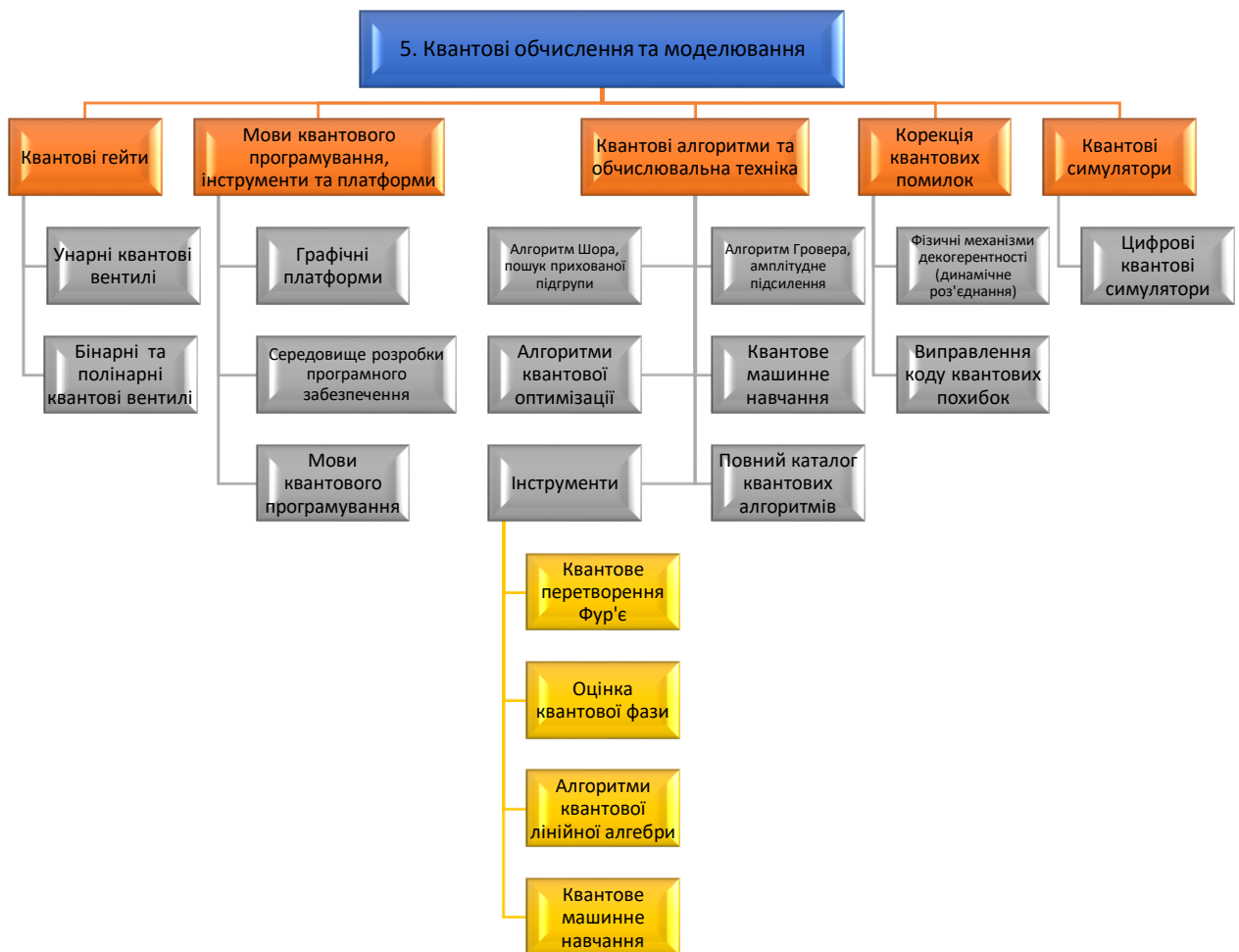


Рис. А.5. П'ята група компетентностей

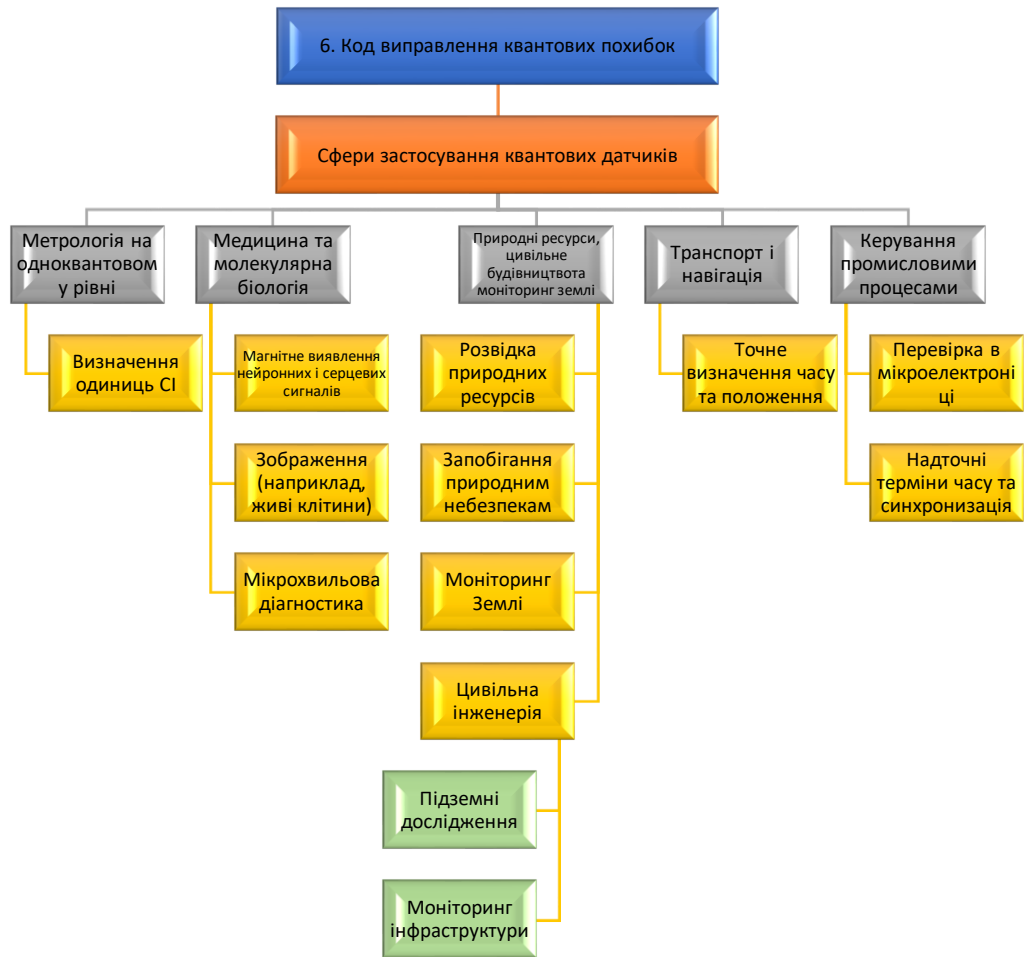


Рис. А.6. Шоста група компетентностей

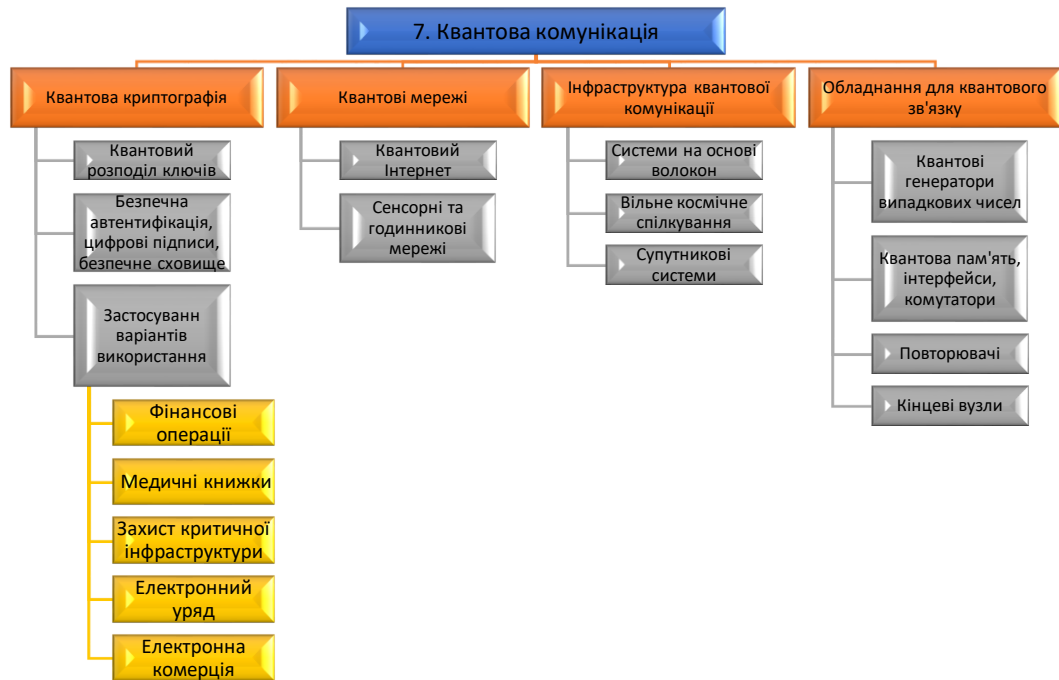


Рис. А.7. Сьома група компетентностей



Рис. А.8. Восьма група компетентностей

Додаток Б

Форма експертного опитування

«Зміст навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв»

Шановні колеги!

З метою добору змісту навчання факультативного курсу "Основи квантової інформатики" для учнів 10-11 класів просимо Вас оцінити значущість складових Європейської рамки компетенцій у галузі квантових технологій (https://qt.eu/app/uploads/2019/02/Competence_Framework_for_QT_1.0_May2021.pdf) та надати Ваші рекомендації щодо змісту навчання шкільного курсу основ квантової інформатики.

1. Фізичні основи квантових технологій

Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з фізичних основ квантових технологій:

– основні поняття квантової фізики (оптики, механіки): суперпозиція, інтерференція; квантування енергії, пов'язані (заплутані) стани, тунелювання; статистична природа квантової фізики; принцип невизначеності Гейзенберга; прості приклади декогеренції (релаксація, дефазування, втрата фотонів); нерівності Белла, стани Белла, квантова телепортація, надщільне кодування; фотонні взаємодії атомів і матерії; поляризаційні ступені свободи (сфера Пуанкаре);

– динаміка кубітів: поняття кубіту, сфера Блоха, маніпулювання кубітами за допомогою імпульсів, математичний опис обертання кубітів.

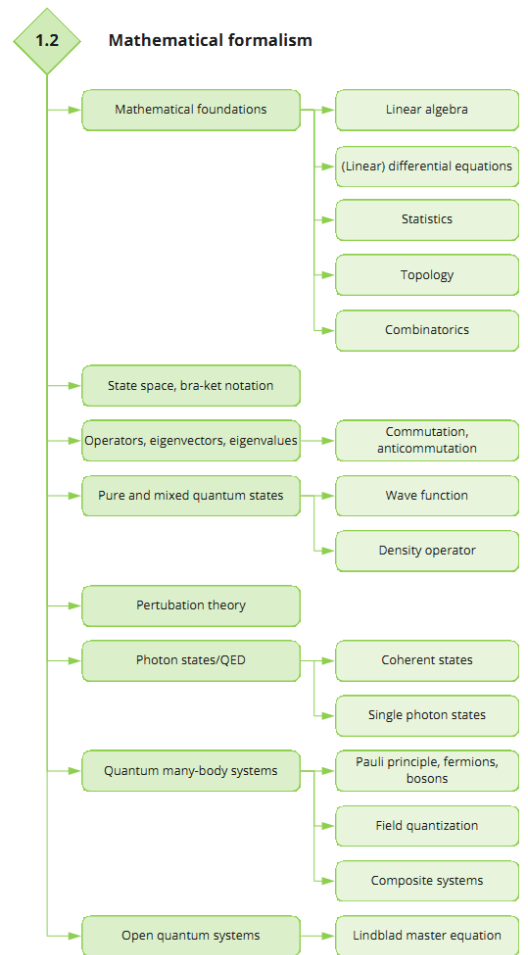
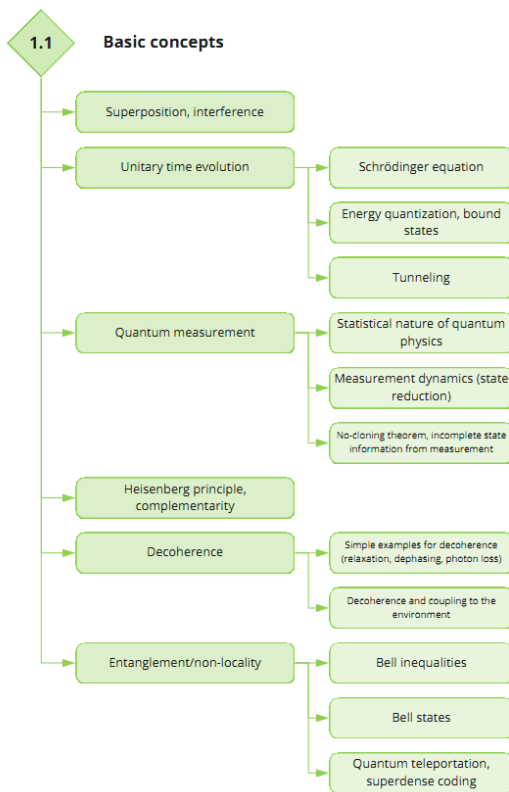
	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
поняття квантової фізики	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
динаміка кубітів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з фізичних основ квантових технологій:

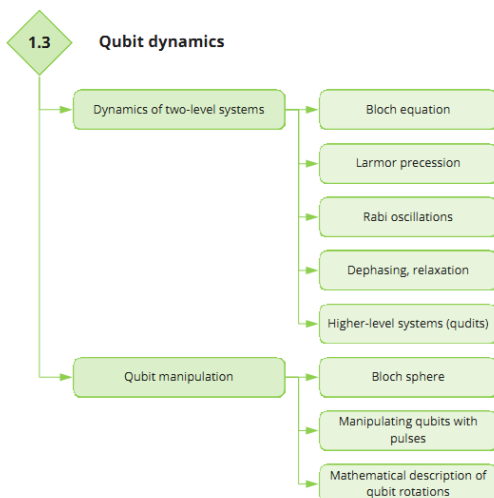
визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах
 математично описувати стани та базиси Белла
 математично описувати надщільне кодування
 математично описувати квантову телепортацію
 подавати кубіт на сфері Блоха
 застосовувати засоби перетворення квантових алгоритмів на керуючі імпульси для квантових комп'ютерів

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
математично описувати стани та базиси Белла	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
математично описувати надщільне кодування	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
математично описувати квантову телепортацію	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
подавати кубіт на сфері Блоха	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
застосовувати засоби перетворення квантових алгоритмів на керуючі імпульси для квантових комп'ютерів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

1 Concepts of quantum physics



1 Concepts of quantum physics (continued)



Які додаткові компетентності з фізичних основ квантових технологій, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

2. Математичні основи квантової інформатики

Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з математичних основ квантової інформатики:

– основи теорії комплексних чисел: поняття комплексного числа, форми запису комплексних чисел, подання/відображення комплексного числа у комплексній площині;

– основи лінійної алгебри: задання векторів на площині та у просторі, операції над векторами; матриці, квадратні матриці, операції над матрицями, унітарні матриці;

– математика основ квантової фізики: бра-кет нотація, хвильова функція, когерентні стани, стани одиночних фотонів;

– статистична природа квантових вимірювань.

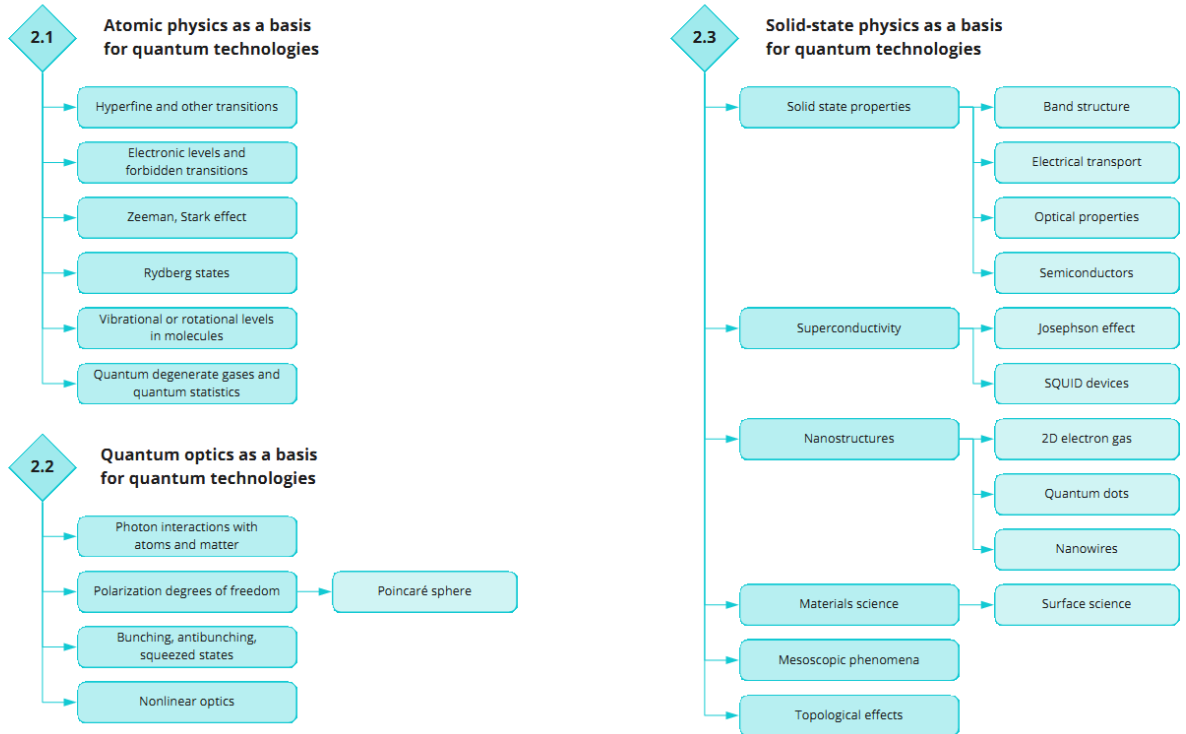
	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
основи теорії комплексних чисел	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
основи лінійної	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

алгебри					
математика основ квантової фізики	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
статистична природа квантових вимірювань	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з математичних основ квантової інформатики:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
пояснювати поняття уявної одиниці та комплексного числа, зображати комплексні числа у комплексній площині, здійснювати перехід від алгебраїчної форми подання до тригонометричної	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра- кет нотації	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
оперувати із стандартними базисами	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
подавати вектор у обраному базисі	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
перетворювати базис подавати вектор у обраному базисі векторного простору	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2 Physical foundations of quantum technologies



Які додаткові компетентності з математичних основ квантової інформатики, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

3. Забезпечувальні технології

Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності із забезпечувальних технологій *

– оптичні технології: класична оптика, лазери, оптоелектронні та оптомеханічні системи, джерела одиночних фотонів, джерела заплутаних фотонів, детектори на одиночних фотонах;

– лабораторні технології: аналіз шуму, технології чистих приміщень;

– експериментальне управління: програмне забезпечення, апаратне забезпечення, квантові алгоритми керування.

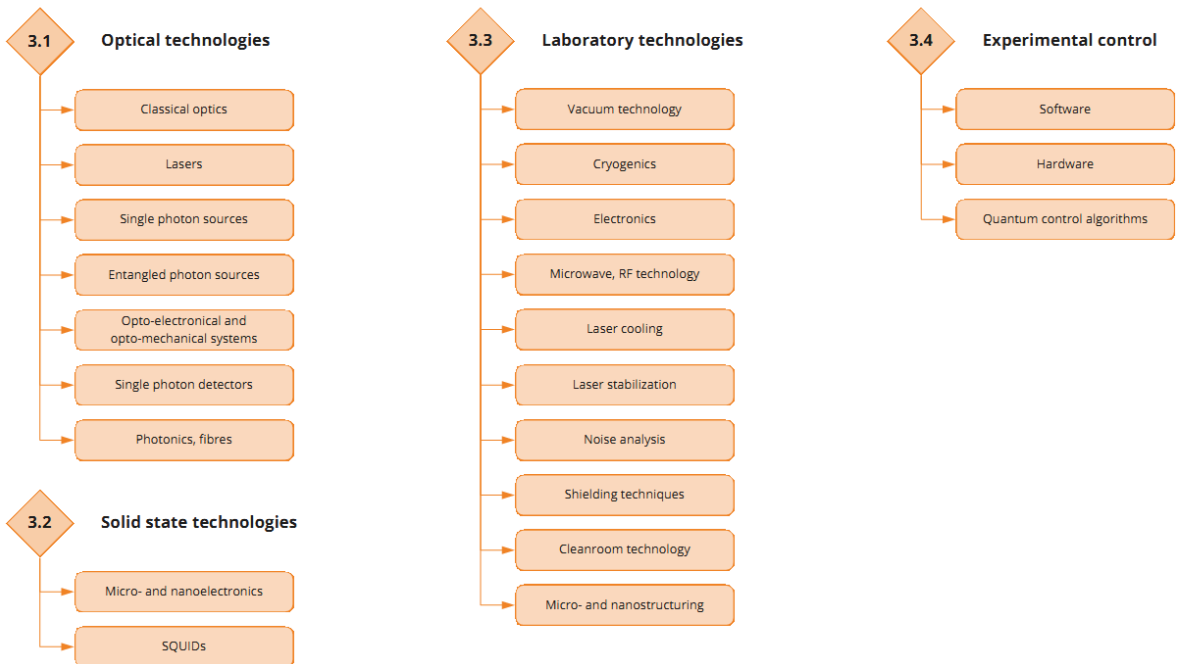
зовсім не важливо мало важливо утруднююсь відповісти скоріше, важливо дуже важливо
 оптичні ○ ○ ○ ○ ○

технології лабораторні технології експериментальне управління	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності із забезпечувальних технологій:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
розрізняти джерела фотонів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
описувати типову структуру джерел одиночних та заплутаних фотонів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3 Enabling technologies



Які додаткові компетентності із забезпечувальних технологій, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

4. Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків

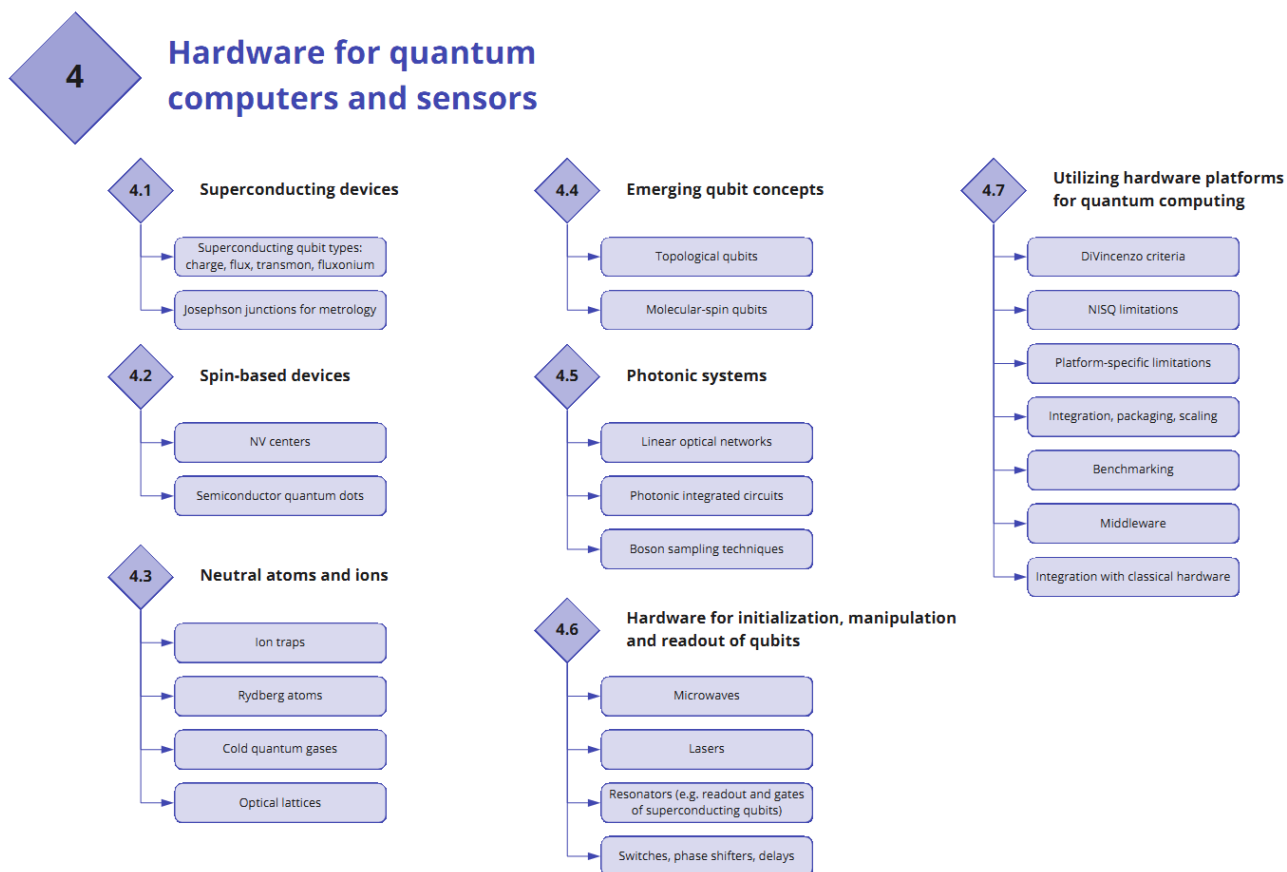
Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з

апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
пристрої на основі спіна: напівпровідникові квантові точки	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
нейтральні атоми та іони: іонні пастки	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
нові види кубітів: молекулярно- спінові кубіти	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
обладнання для ініціалізації, маніпуляції та зчитування кубітів: мікрохвилі, лазери, резонатори (наприклад, зчитування та затвори надпровідних кубітів), вимикачі, фазоперемикачі, затримувачі	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
використання апаратних платформ для квантових обчислень: порівняльний аналіз, інтеграція з класичним обладнанням	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
описувати типові структури квантових комп'ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



Які додаткові компетентності із апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

5. Квантові обчислення та моделювання

Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з квантових обчислень та моделювання:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, дуже важливо	дуже важливо
квантові вентиля: однокубітні вентилі, двокубітні та багатокубітні вентиля	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
квантові мови, засоби та платформи програмування: графічні платформи, середовище розробки програмного забезпечення, мови квантового програмування	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
базові квантові алгоритми:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

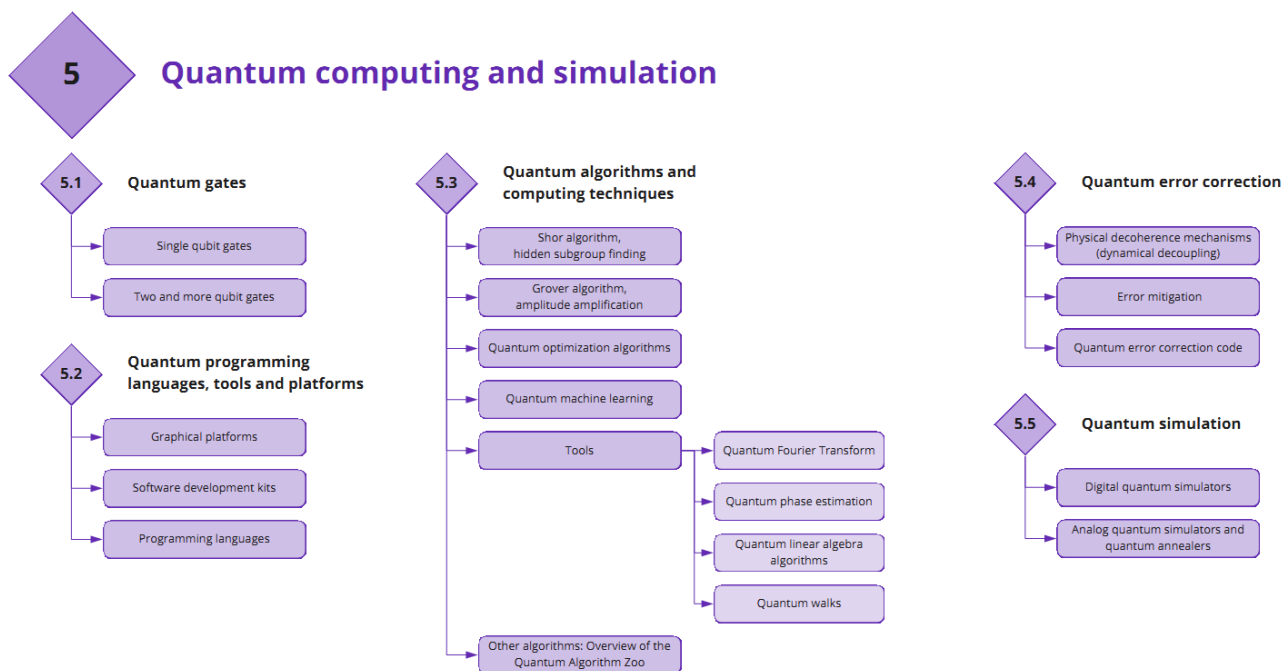
алгоритм Шора, алгоритм
Гровера, алгоритми квантової
оптимізації, оцінка квантової
фази, алгоритми квантової
лінійної алгебри, квантові
блукання, інші алгоритми
квантова корекція помилок:
фізичні механізми
дикогерентності, код
виправлення квантових похибок
елементи квантового
моделювання: цифрові квантові
симулятори

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з
квантових обчислень та моделювання:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
записувати квантові вентилі за допомогою унітарних матриць	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
розрізняти та застосовувати однокубітні вентилі (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентилі Тоффолі та Фредкіна)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
застосовувати квантові вентилі для запису квантових алгоритмів	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
послугуватись мовами та засобами квантового програмування	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
використовувати бібліотеки квантових алгоритмів оптимізації, машинного навчання, квантового блукання,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

квантового
перетворення Фур'є та
ін.
застосовувати засоби
квантової корекції
помилки
працювати із
квантовими
симуляторами



Які додаткові компетентності із квантових обчислень та моделювання, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

6. Квантові датчики та метрологія

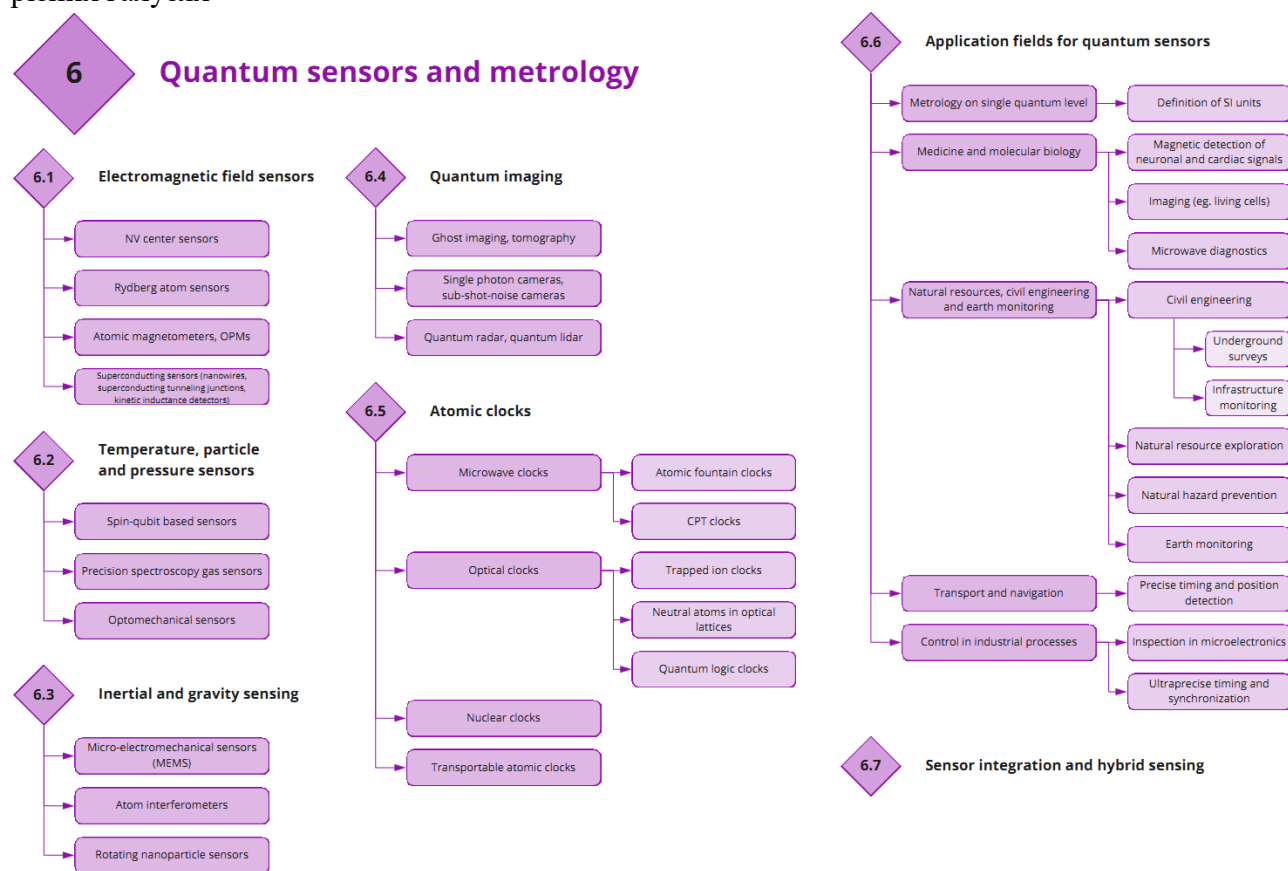
Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з квантових датчиків та метрології *

- атомні годинники;
- галузі застосування квантових датчиків: метрологія на одноквантовому рівні; медицина та молекулярна біологія; природні ресурси, цивільне будівництво та моніторинг Землі; транспорт і навігація; управління промисловими процесами.

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
атомні годинники	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
галузі застосування квантових датчиків	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з квантових датчиків та метрології:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
описувати переваги та обмеження використання квантових датчиків (сенсорів) порівняно з іншими типами датчиків	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
пояснювати особливості будови атомних годинників	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



Які додаткові компетентності із квантових датчиків та метрології, на Вашу

думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

7. Квантова комунікація

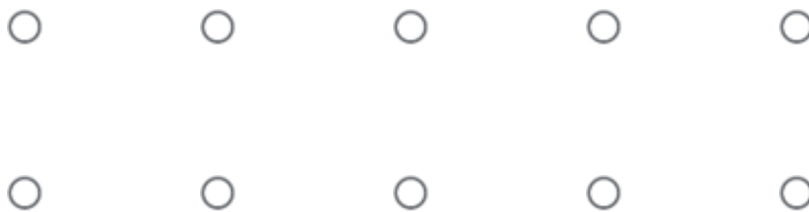
Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з квантової комунікації:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
квантова криптографія:					
квантовий розподіл ключа, безпечна автентифікація, цифрові підписи, безпечне сховище; галузі застосування	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
квантові мережі: квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі інфраструктура та обладнання	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
квантового зв'язку: волоконно-оптичні системи, бездротовий зв'язок, супутникові системи; квантові генератори	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
випадкових чисел; квантова пам'ять, інтерфейси, комутатори; повторювачі, кінцеві вузли					

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з квантової комунікації:

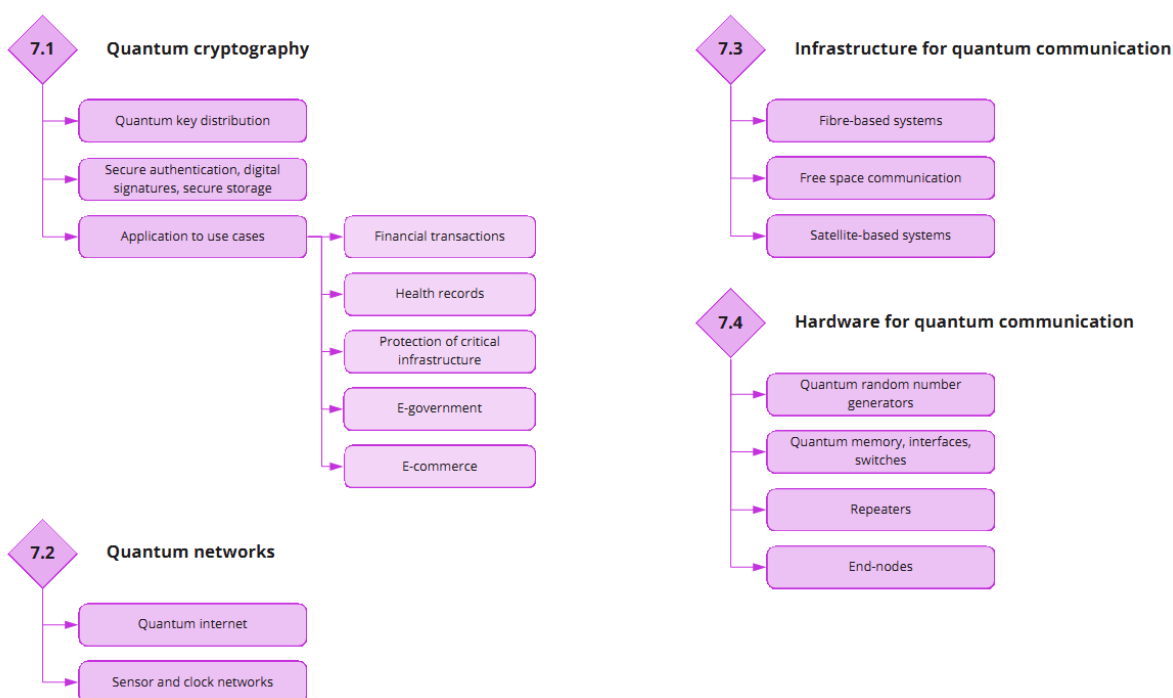
	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
демонструвати роботу протоколів BB84, E91	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
описувати корекцію помилки із квантовим кульбітом	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
послугуватись квантовими	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

генераторами
випадкових чисел
описувати принципи
роботи та будову
обладнання квантових
мереж
наводити приклади
застосування
квантової
криптографії у різних
галузях



7

Quantum communication



Які додаткові компетентності із квантової комунікації, на Вашу думку, мають бути сформовані в шкільному курсі основ квантової інформатики?

Ваша відповідь _____

8. Практичні навички та загальні компетенції

Оцініть важливість наступних ЗНАНЬ для формування компетентності з практичних навичок та загальних компетенцій:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
основи класичного (неквантового) програмування: мови	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

програмування, алгоритми, класи складності, криптографія застосування квантових технологій	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
загальні навички/компетенції: навички управління та лідерства (огляд, потенціал та обмеження, економічний вплив квантових технологій, підприємництво, розробка та реалізація проєкту); комунікація з експертами в галузі; дослідницька етика та відповідальність, інноваційність; знання про інтелектуальну власність, стандартизацію, сертифікацію	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть важливість наступних УМІНЬ для формування компетентності з практичних навичків та загальних компетенцій:

	зовсім не важливо	мало важливо	утруднююсь відповісти	скоріше, важливо	дуже важливо
реалізувати базові класичні алгоритми (зокрема криптографічні) мовами програмування	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
наводити приклади використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
демонструвати навички управління та лідерства, мережевої взаємодії та спілкування з експертами	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

квантової
комунікації
практичних
навичок та
загальних
компетенцій

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Оцініть свій рівень компетентності у квантовій інформатиці *

- маю початкові уявлення
- обізнаний з окремими складовими
- глибоко обізнаний з окремими складовими
- експерт

Ваша посада:

- студент
- учитель
- науковий співробітник
- викладач
- Інше: _____

Стаж Вашої роботи *

- до 5 років
- 5-10 років
- 11-20 років
- 21-30 років
- 31-40 років
- 41-50 років
- понад 50 років

Ваша контактна адреса електронної пошти, побажання та зауваження.

Вкажіть Ваш email, якщо Ви бажаєте отримати результати опитування

Ваша відповідь _____

Додаток В

Вивчення думки вчителів інформатики закладів загальної середньої освіти про актуальність і доцільність уведення основ квантової інформатики

Основи квантової інформатики для учнів профільної (старшої) школи

Шановний колего!

Допоможіть дізнатися Вашу думку про модуль "Основи квантової інформатики"

Заповнення анкети є анонімним.

Вкажіть предмет, що Ви викладаєте

- інформатика
- математика
- фізика
- хімія
- трудове навчання та технології
- інше: _____

Вкажіть ваш вік

- до 25-ти років
- 25-35 років
- 35-45 років
- 45-55 років
- старше 55-ти років

Ваш заклад освіти розташований у

- столиці
- обласному центрі
- місті (не обласному центрі)
- селищі міського типу
- селі

Ваш педагогічний стаж

- менше 1-го року
- 1-5 років
- 5-10 років
- 10-20 років
- більше 20 років

Чи вважаєте Ви правильним твердження, що оточення повинне випереджати розвиток?

- так
- ні

Чи погоджуєтеся Ви, що середня освіта повинна надавати актуальні знання?

- так
- ні
- складно відповісти

Чи вважаєте ви правильним враховувати при вивченні дисципліни сучасні досягнення галузі?

- так
- ні

За яких умов Ви із задоволенням сприймаєте введення нових розділів, тем до навчальної програми дисципліни?

- завжди із задоволенням
- із задоволенням, якщо є достатня методична підтримка
- не терплю змін

Чи погоджуєтесь Ви з тим, що навчальний матеріал можна і треба адаптовувати відповідно віку?

- так
- ні

Чи використовуєте Ви на навчальних заняттях хмарні сервіси, онлайн доступ до ресурсів, віртуальні лабораторії тощо? *

- так, майже на кожному занятті
- так, лише під час дистанційного навчання
- ніколи, бо мені важко опанувати ці сервіси
- ні

Чи хотіли б Ви особисто пройти курс "Основи квантової інформатики" *
так, хотілося б, бо мені зустрічалося багато публікацій і навчальних відео з цієї теми

- так, але не зараз
- ні

Чи запропонували б Ви курс "Основи квантової інформатики" для здобувачів освіти у своєму закладі? *

- так
- так, але після того як самостійно пройду цей курс
- так, за наявності методичної підтримки
- так, але думаю, що це може бути складно для здобувачів освіти у моєму

закладі

- ні, бо цей курс не відповідає профілю навчання закладу, де я працюю
- ні

Заповнюючи форму, Ви тим самим даєте згоду на обробку своїх особистих персональних даних відповідно до Закону України «Про захист персональних даних» від 01.06.2010 р. № 2297-VI

так

Додаток Г

Витяги з навчальних програм для 5-11 класів

**Навчальна програма з математики
(Алгебра і початки аналізу та геометрія)
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Рівень стандарту**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
10 клас	
Тема. КООРДИНАТИ І ВЕКТОРИ	
<p>Учень/учениця: користується аналогією між векторами і координатами на площині й у просторі; усвідомлює важливість векторно-координатного методу в математиці; виконує операції над векторами; застосовує вектори для моделювання і обчислення геометричних і фізичних величин; знаходить відстань між двома точками, координати середини відрізка, координати точок симетричних відносно початку координат та координатних площин; використовує координати у просторі для вимірювання відстаней, кутів;</p>	<p>Прямокутні координати в просторі. Координати середини відрізка. Відстань між двома точками. Вектори у просторі. Операції над векторами. Формули для обчислення довжини вектору, кута між векторами, відстані між двома точками. Симетрія відносно початку координат та координатних площин</p>

**Навчальна програма з математики
(Алгебра і початки аналізу та геометрія)
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Поглиблений рівень**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
Алгебра і початки аналізу, 10 клас	
Тема 9. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТЕЙ	
<p>Учень (учениця): обчислює ймовірність події, користуючись аксіомами теорії ймовірностей, наслідками з них, операціями над подіями, поняттям умовної ймовірності, незалежних подій, комбінаторними схемами, математичне сподівання випадкової величини; пояснює зміст понять умовна ймовірність, незалежні події, випадкова величина.</p>	<p><i>Біном Ньютона та трикутник Паскаля.</i> Аксіоми теорії ймовірностей. Операції над подіями. Основні наслідки з аксіом теорії ймовірностей. Незалежні події. Умовна ймовірність. Випадкова величина та її математичне сподівання (у досліді зі скінченною множиною елементарних наслідків). <i>Геометрична ймовірність.</i></p>
Тема 10. КОМПЛЕКСНІ ЧИСЛА ТА МНОГОЧЛЕНИ	
<p>Учень (учениця): описує поняття комплексного числа, його модуля й аргументу; формулює правила дій</p>	<p><i>Множина комплексних чисел. Геометрична інтерпретація комплексного числа.</i> <i>Алгебраїчна і тригонометрична форми запису</i></p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p>над комплексними числами в алгебраїчній і тригонометричній формах; знаходить суму, різницю, добуток та частку комплексних чисел, степінь комплексного числа та корінь із комплексного числа; виконує ділення многочленів з остачею; формулює означення кратного кореня та знаходить його кратність; застосовує теорему Вієта до розв'язування задач.</p>	<p><i>комплексного числа. Дії над комплексними числами в різних формах запису. Формула Муавра. Корінь n-го степеня з комплексного числа.</i> <i>Многочлен та його корені. Розклад многочлена на незвідні множники. Кратні корені. Основна теорема алгебри. Теорема Вієта. [Многочлен третього степеня. Рівняння вищих степенів. Формула Кардано.]</i></p>
Геометрія, 10 клас	
Тема 4. КООРДИНАТИ, ВЕКТОРИ, ГЕОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ПРОСТОРИ	
<p>Учень/учениця формулює означення, ознаки, властивості понять, зазначених у змісті навчального матеріалу; розрізняє векторні і скалярні величини; рівні вектори, колінеарні вектори, компланарні вектори; класифікує взаємне розміщення двох (трьох) векторів у просторі; зображає на рисунку вектор, рівний сумі/різниці векторів, добутку вектора на число; обґрунтовує перпендикулярність, колінеарність та компланарність векторів простору; ілюструє текстовий зміст геометричних тверджень та задач за допомогою рисунка; застосовує формули довжини відрізка, координат середини відрізка, координат вектора, довжини вектора, скалярного добутку двох векторів, загального вигляду рівняння площини/сфери, паралельного перенесення до розв'язування задач; розв'язує вправи, що передбачають: знаходження довжин відрізків; векторів; кута між векторами; дослідження виду многокутника за довжинами його елементів.</p>	<p>Прямокутна декартова система координат у просторі, координатний простір. Координати точки. Формула відстані між двома точками. Координати середини відрізка. Координати точки, яка ділить відрізок у заданому відношенні. Вектори у просторі. Координати вектора. Довжина вектора. Рівність векторів. Колінеарність векторів. Компланарність векторів. Операції над векторами та їх властивості: додавання і віднімання векторів, множення вектора на число, скалярний добуток векторів. Кут між векторами. Поняття про координатний і векторний методи розв'язування задач. Найпростіші геометричні місця точок простору. Рівняння площини. Перетворення у просторі: симетрія відносно точки, симетрія відносно площини, паралельне перенесення, подібність.</p>

**Навчальна програма з математики
(Алгебра і початки аналізу та геометрія)
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Профільний рівень**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
Алгебра і початки аналізу, 11 клас	
Тема. ЕЛЕМЕНТИ КОМБІНАТОРИКИ, ТЕОРІЙ ЙМОВІРНОСТЕЙ	
Учень (учениця):	Елементи комбінаторики.

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p>обчислює ймовірність події, користуючись аксіомами теорії ймовірностей, наслідками з них, операціями над подіями, поняттям умовної ймовірності, незалежних подій, комбінаторними схемами, математичне сподівання випадкової величини;</p> <p>пояснює зміст понять умовна ймовірність, незалежні події, випадкова величина;</p>	<p>Перестановки, розміщення, комбінації. Аксіоми теорії ймовірностей. Операції над подіями. Основні наслідки з аксіом теорії ймовірностей. Незалежні події. Умовна ймовірність. Випадкова величина та її математичне сподівання (у досліді зі скінченною множиною елементарних наслідків).</p>
Геометрія, 10 клас	
Тема 4. КООРДИНАТИ, ВЕКТОРИ, ГЕОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ПРОСТОРИ	
<p>Учень/учениця наводить приклади моделей симетрії відносно точки та прямої із об'єктів навколишнього середовища;</p> <p>формулює означення, ознаки, властивості понять, зазначених у змісті навчального матеріалу;</p> <p>розрізняє векторні і скалярні величини; рівні вектори, колінеарні вектори, компланарні вектори;</p> <p>пояснює та записує зв'язок між паралельністю та перпендикулярністю прямих і площин; відстань у просторі: від точки до прямої, відрізка, променя; від точки до площини, півплощини; від прямої до паралельної їй площини; відстань між паралельними площинами; відстань між мимобіжними прямими.</p> <p>класифікує взаємне розміщення двох (трьох) векторів у просторі;</p> <p>зображає на рисунку правила додавання векторів (трикутника та паралелограма); суму/різницю векторів, добуток вектора на число;</p> <p>знаходить на рисунку та зображає напрямлений відрізок як вектор, що дорівнює сумі, різниці векторів, добутку вектора на число; симетрію відносно точки; симетрію відносно площини;</p> <p>аналізує та досліджує координатному просторі: координати точок; відстань між двома точками; координати середини відрізка; координати точки, яка ділить відрізок у заданому відношенні; перетворення паралельного перенесення;</p> <p>обґрунтовує перпендикулярність, колінеарність та компланарність векторів простору; скалярний добуток векторів;</p> <p>ілюструє текстовий зміст геометричних тверджень та задач за допомогою рисунка;</p> <p>характеризує найпростіші геометричні місця точок простору; координатний і векторний методи розв'язування задач;</p> <p>застосовує формули довжини відрізка, координат середини відрізка, координат вектора, довжини вектора, скалярного добутку двох векторів,</p>	<p>Прямокутна декартова система координат у просторі, координатний простір. Координати точки. Формула відстані між двома точками.</p> <p>Координати середини відрізка. Координати точки, яка ділить відрізок у заданому відношенні.</p> <p>Вектори у просторі. Координати вектора. Довжина вектора.</p> <p>Рівність векторів. Колінеарність векторів. Компланарність векторів. Операції над векторами та їх властивості: додавання і віднімання векторів, множення вектора на число, скалярний добуток векторів. Кут між векторами. Поняття про координатний і векторний методи розв'язування задач.</p> <p>Найпростіші геометричні місця точок простору.</p> <p>Рівняння площини, сфери.</p> <p>Перетворення у просторі: симетрія відносно точки, симетрія відносно площини, паралельне перенесення.</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
загального вигляду рівняння площини/сфери, паралельного перенесення до розв'язування задач; розв'язує вправи, що передбачають: знаходження довжин відрізків; векторів; кута між векторами; дослідження виду многокутника за довжинами його елементів; доведення виду чотирикутника/трикутника за відомими координатами точок та відомими властивостями їх різновидів; знаходження розв'язків задач координатним і векторним методами; моделювання задач природничих дисциплін навчально-практичного та прикладного змісту.	

**Навчальна програма з фізики
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Рівень стандарту**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
10 клас	
Розділ 3. ОПТИКА	
<p>Знаннєвий компонент Оперує основними поняттями геометричної оптики: світловий промінь, закони відбивання та заломлення, показник заломлення, повне відбивання, рефракція, зображення, лінзи. Оперує поняттями хвильової та квантової оптики: когерентність, інтерференція та дифракція світла, принцип Гюйгенса—Френеля, дифракційні ґратки, спектроскоп, квант, фотон, стала Планка, фотоефект, закони фотоефекту, рівняння Ейнштейна для фотоефекту, рентгенівське випромінювання, шкала електромагнітних хвиль, корпускулярно-хвильовий дуалізм світла.</p> <p>Діяльнісний компонент Розв'язує задачі на застосування законів геометричної оптики, на розрахунки оптичних систем, на зв'язок довжини та частоти світлової хвилі, умови інтерференційних максимумів і мінімумів, на застосування формули дифракційних ґраток, рівняння Ейнштейна для фотоефекту. Користується оптичними приладами, вимірює довжину світлової хвилі.</p> <p>Ціннісний компонент Пояснює роль і принципи застосування оптичних приладів у сучасній техніці та медицині, розуміє єдність законів, що</p>	<p>Розвиток уявлень про природу світла. Світло як електромагнітна хвиля. Поширення, поглинання та розсіювання світла. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової. Закони геометричної оптики. Показник заломлення, його зв'язок зі швидкістю світла в середовищі. Рефракція та міражі. Отримання зображень Лінзи, оптичні системи та оптичні прилади. Когерентність світлових хвиль. Особливості лазерного випромінювання. Інтерференція світла. Принцип Гюйгенса—Френеля. Дифракція світла. Дифракційні ґратки. Спектроскоп. Неперервний спектр світла. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла. Формула Планка. Квантові властивості світла. Світлові кванти. Стала Планка. Фотоефект. Досліди О.Г. Столетова. Закони фотоефекту. Теорія Ейнштейна, рівняння фотоефекту. Фотон. Фоторезистори та фотоелементи. Застосування фотоефекта, сонячні батареї. Рентгенівське випромінювання, його застосування в медицині та техніці. Роботи І. Пулюя. Фотохімічна дія світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. Шкала електромагнітних хвиль. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів.</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
описують світлові хвилі та інші електромагнітні випромінювання	Електромагнітні хвилі в природі та техніці
11 клас	
Розділ 4. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА	
<p>Знаннєвий компонент Оперує поняттями та термінами: планетарна модель атома, квантові постулати Бора, енергетичні рівні атомів, лазери, корпускулярно-хвильовий дуалізм, лінійчаті спектри, спектральний аналіз, енергія зв'язку атомного ядра, дефект мас, радіоактивність, закон радіоактивного розпаду, період піврозпаду, ланцюгова реакція поділу ядер, ядерний реактор, елементарні частинки.</p> <p>Діяльнісний компонент Розв'язує задачі на застосування квантових постулатів Бора, формули де Бройля, на енергію зв'язку атомних ядер і дефект мас. Вміє користуватися дозиметром.</p> <p>Ціннісний компонент Аналізує явища, що свідчать про складну структуру атомів і атомних ядер, висловлює відношення до корпускулярно-хвильового дуалізму, до проблем сучасної ядерної енергетики; пояснює методи захисту від радіоактивного випромінювання.</p>	<p>Розвиток уявлень про атоми. Дослід Резерфорда. Планетарна модель атома, її якісне обґрунтування на основі постулатів Бора. Енергетичні рівні атома. Гіпотеза де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм як загальна властивість матерії. Випромінювання та поглинання світла атомами. Лінійчасті спектри. Принцип дії лазера. Взаємодії між нуклонами в ядрі, стійкість атомних ядер. Енергія зв'язку атомного ядра. Дефект мас. Природна та штучна радіоактивність, види радіоактивного випромінювання. Закон радіоактивного розпаду. Отримання та застосування радіонуклідів. Методи реєстрації іонізуючого випромінювання і захист від нього. Дозиметр. Ядерні реакції, способи вивільнення ядерної енергії. Ланцюгова реакція поділу ядер і термоядерні реакції. Ядерний реактор, перспективи створення термоядерного реактора. Елементарні частинки, їх класифікація. Поняття про фундаментальні взаємодії.</p>

**Навчальна програма з фізики
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Профільний рівень**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
10 клас	
ВСТУП	
<p>Знаннєвий компонент Оперує поняттями і термінами про основні етапи розвитку фізики, розрізняє одиниці величин, знає принципи вимірювань, наочний зміст похідної та інтегралу.</p> <p>Діяльнісний компонент Вміє оцінювати похибки (невизначеності) прямих і непрямих вимірювань, застосовувати векторні величини, здійснювати перевірку одиниць у отриманих формулах. Розрізняє основні, додаткові та похідні одиниці в СІ.</p> <p>Ціннісний компонент Усвідомлює необхідність саморозвитку й</p>	<p>Природничі науки та світогляд сучасної людини. Зародження й розвиток фізики як науки. Роль фізичного знання в житті людини та суспільному розвитку. Теорія та експеримент, роль фундаментальних фізичних теорій. Фізичні моделі. Одиниці фізичних величин, Міжнародна система одиниць СІ. Прямі та непрямі вимірювання, похибки (невизначеності) вимірювань. Систематичні та випадкові похибки (невизначеності). Зв'язки між математикою та фізикою. Скалярні та векторні величини, проекції векторів, поняття про похідну та інтеграл. Наближені обчислення, поняття про числові методи та комп'ютерне</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
самонавчання в умовах глобальних змін і викликів, розуміє важливість природничої освіти та розвитку природничих наук	моделювання фізичних процесів. Зв'язки між фізикою та сучасними цифровими технологіями.
11 клас	
Розділ 3. ОПТИКА	
<p>Знаннєвий компонент Оперує основними поняттями геометричної оптики: світловий промінь, закони відбивання та заломлення, показник заломлення, повне відбивання, рефракція, принцип Ферма, зображення, лінзи, аберації. Оперує поняттями хвильової та квантової оптики: когерентність, інтерференція та дифракція світла, принцип Гюйгенса — Френеля, дифракційні ґратки, дифракційний спектр, голографія, спектроскоп, роздільна здатність, поляризація світла, квант, фотон, стала Планка, фотоефект, закони фотоефекту, рівняння Ейнштейна для фотоефекту, тиск світла, рентгенівське випромінювання, шкала електромагнітних хвиль, корпускулярно-хвильовий дуалізм світла.</p> <p>Діяльнісний компонент Розв'язує задачі на застосування законів геометричної оптики, на розрахунки оптичних систем, на зв'язок довжини та частоти світлової хвилі, умови інтерференційних максимумів і мінімумів, на просвітлення оптики та кільця Ньютона, на застосування формули дифракційних ґраток, енергії та імпульсу фотона, рівняння Ейнштейна для фотоефекту, на ефект Комптона. Користується оптичними приладами, вимірює довжину світлової хвилі.</p> <p>Ціннісний компонент Пояснює роль і принципи застосування оптичних приладів у сучасній техніці та медицині, усвідомлює</p>	<p>Розвиток уявлень про природу світла. Світло як електромагнітна хвиля. Поширення, поглинання та розсіювання світла. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової. Закони геометричної оптики. Принцип Ферма. Показник заломлення, його зв'язок зі швидкістю світла в середовищі. Рефракція та міражі. Отримання зображень. Лінзи, оптичні системи та оптичні прилади. Аберації. Когерентність світлових хвиль. Особливості лазерного випромінювання. Інтерференція світла. Інтерференція в тонких пластинах і плівках. Просвітлення оптики. Кільця Ньютона. Інтерферометр А. Майкельсона. Дифракція світла. Принцип Гюйгенса — Френеля. Зони Френеля. Дифракційні картини від щілини, тонкої нитки, круглого отвору. Дифракційні ґратки. Дифракційний спектр, його порівняння з дисперсійним. Поняття про голографію. Спектроскоп. Неперервний спектр світла. Роздільна здатність оптичних приладів. Поляризація світла. Природне й поляризоване світло. Методи поляризації світла. Кут Брюстера. Принцип дії рідкокристалічних екранів. Формула Планка. Квантові властивості світла. Світлові кванти. Стала Планка. Фотоефект. Досліди Столетова. Закони фотоефекту. Теорія Ейнштейна, рівняння фотоефекту. Внутрішній фотоефект, фоторезистори та фотоелементи. Застосування фотоефекта. Фотон. Енергія та імпульс фотона. Тиск світла. Дослід П.М. Лебедева. Рентгенівське випромінювання, його застосування в медицині та техніці. Роботи І. Пулюя. Ефект Комптона та дослід Боте як свідчення про корпускулярні властивості світла. Фотохімічна дія світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. Шкала електромагнітних хвиль. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів. Електромагнітні хвилі в природі та техніці.</p>
Розділ 4. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА	
<p>Знаннєвий компонент Оперує поняттями та термінами: ядерна модель атома, квантові постулати Бора,</p>	<p>Розвиток уявлень про атоми. Дослід Резерфорда, ядерна модель атома. Квантові постулати Бора. Енергетичні рівні атома.</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p>енергетичні рівні атомів, спонтанне та вимушене випромінювання, лазери, мазери, корпускулярно-хвильовий дуалізм, принцип Паулі, лінійчасті спектри, спектральний аналіз, енергія зв'язку атомного ядра, дефект мас, радіоактивність, закон радіоактивного розпаду, період піврозпаду, дози випромінювання, ланцюгова реакція поділу ядер, ядерний реактор, елементарні та фундаментальні частинки.</p> <p>Діяльнісний компонент Розв'язує задачі на застосування закону радіоактивного розпаду, квантових постулатів Бора, формули де Бройля, на енергію зв'язку атомних ядер і дефект мас, на визначення дози випромінювання. Уміє користуватися дозиметром.</p> <p>Ціннісний компонент Аналізує явища, що свідчать про складну структуру атомів і атомних ядер, висловлює відношення до корпускулярно-хвильового дуалізму, до проблем сучасної ядерної енергетики, до широкого застосування лазерів у сучасній техніці та медицині; пояснює методи захисту від радіоактивного випромінювання</p>	<p>Випромінювання та поглинання світла атомами. Теорія атома Гідрогену за Бором. Досліди Д. Франка та Г. Герца. Лінійчасті спектри. Спонтанне та вимушене випромінювання. Принцип дії квантових генераторів. Лазери та мазери. Люмінесценція. Гіпотеза де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм як загальна властивість матерії. Принцип невизначеності Гейзенберга. Поняття про квантування енергії частинки в потенціальній ямі. Поняття про тунельний ефект. Принцип Паулі. Фізичні основи побудови періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва. Рентгенівські спектри. Рентгеноструктурний аналіз. Взаємодії між нуклонами, стійкість атомних ядер. Енергія зв'язку атомного ядра. Дефект мас. Природна та штучна радіоактивність, види радіоактивного випромінювання. Закон радіоактивного розпаду. Отримання та застосування радіонуклідів. Методи реєстрації іонізуючого випромінювання і захист від нього. Дозиметр. Ядерні реакції, способи вивільнення ядерної енергії. Ланцюгова реакція поділу ядер і термоядерні реакції. Ядерний реактор, перспективи створення термоядерного реактора. Елементарні частинки, їх класифікація. Сучасні погляди та структуру адронів. Фундаментальні взаємодії.</p>

**Навчальна програма з інформатики
для учнів 5-9 класів загальноосвітніх навчальних закладів**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
8 клас	
КОДУВАННЯ ДАНИХ ТА АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
<p>Учень/учениця Знаннєва складова Розуміє поняття двійкового коду, називає одиниці вимірювання його довжини та пояснює їх співвідношення. Описує загальний принцип побудови таблиці кодів символів. Пояснює деякі принципи кодування графічних даних. Має уявлення про взаємодію складових обчислювальних пристроїв, описує їхні основні характеристики. Наводить приклади застосування сучасних пристроїв у різних галузях.</p>	<p>Опрацювання даних як інформаційний процес. Кодування та декодування повідомлень. Двійкове кодування. Одиниці вимірювання довжини двійкового коду. Кодування тексту й графічних даних. Таблиці кодів символів. Персональний комп'ютер, його основні складові. Процесор, пристрої пам'яті, введення та виведення даних, мультимедійні пристрої. Технічні характеристики та призначення основних складових персонального комп'ютера. Історія обчислювальних та комп'ютерних пристроїв. Види сучасних комп'ютерів та їх застосування</p>

Очікувані результати навчально-познавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p><i>Описує</i> процес обробки даних комп'ютерними пристроями</p> <p>Діяльнісна складова</p> <p><i>Уміє</i> кодувати і декодувати повідомлення за певними правилами.</p> <p><i>Визначає</i> характеристики складових персонального комп'ютера залежно від його призначення</p> <p>Ціннісна складова</p> <p><i>Усвідомлює</i> зв'язок між інформаційними технологіями та потребами й етапами розвитку людського суспільства</p>	
АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМИ	
<p>Учень/учениця</p> <p>Знаннєва складова</p> <p><i>Розуміє</i> призначення мови програмування та основних її елементів. Наводить приклади сучасних мов програмування.</p> <p><i>Знає</i> відмінність між змінними та константами.</p> <p><i>Порівнює</i> особливості різних середовищ програмування.</p> <p><i>Розуміє</i> поняття об'єкта в мові програмування, його властивостей і методів.</p> <p><i>Пояснює</i> структуру програми.</p> <p><i>Пояснює</i> функції елементів графічного інтерфейсу та користується ними.</p> <p><i>Розрізняє</i> властивості і методи елементів управління</p> <p>Діяльнісна складова</p> <p><i>Планує</i> процес розв'язування задачі з використанням програмування.</p> <p><i>Створює і налагоджує</i> програми, зокрема подійно- й об'єктно-орієнтовані.</p> <p><i>Використовує</i> в програмах вирази, коректно добирає типи даних.</p> <p><i>Розв'язує</i> задачі з використанням усіх базових алгоритмічних структур, змінних та констант.</p> <p><i>Обґрунтовує</i> вибір типів даних для розв'язування задачі</p> <p>Ціннісна складова</p> <p><i>Оцінює</i> відповідність результатів виконання програми поставленій задачі.</p> <p><i>Розпізнає</i> задачі, для розв'язання яких доцільно використовувати засоби програмування</p>	<p>Сучасні мови програмування.</p> <p>Поняття об'єкта в мові програмування, його властивостей і методів. Графічний інтерфейс, основні компоненти програми з графічним інтерфейсом. Поняття елемента керування. Обробники подій, пов'язаних з елементами керування. Властивості та методи елементів керування.</p> <p>Типи даних у програмуванні. Структура програми. Введення й виведення даних. Вирази. Логічні вирази та змінні й операції над ними. Умовні оператори (коротка та повна форма). Складені умови. Оператори циклу. Вкладені цикли.</p> <p>Пошук найбільшого та найменшого серед кількох значень</p>

**Навчальна програма з інформатики
для учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.
Профільний рівень**

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
10 клас	
МОВА ПРОГРАМУВАННЯ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ	
<p>Знання складова</p> <p>Розуміє призначення мови програмування та її елементів.</p> <p>Наводить приклади середовищ програмування та мов, які вони підтримують.</p> <p>Знає особливості та області застосування сучасних середовищ програмування.</p> <p>Розуміє поняття консольного режиму виконання програми та графічного інтерфейсу.</p> <p>Наводить приклади типів даних та пояснює їх призначення.</p> <p>Пояснює поняття об'єкта, класу як об'єктного типу даних, події та обробника подій. Розглядає певні типи програмних проектів як подійно- та об'єктно-орієнтовані середовища.</p> <p>Пояснює поняття логічного виразу, знає таблиці істинності і вміє застосовувати логічні функції і складені логічні вирази.</p> <p>Пояснює відмінність між формальними і фактичними параметрами.</p> <p>Пояснює поняття масиву, списку, словника, стеку, черги, хеш-таблиці та наводить їх приклади. Розпізнає, розрізняє та класифікує різні структури даних.</p> <p>Пояснює доцільність використання та особливості визначеної структури даних у заданих алгоритмах.</p> <p>Пояснює поняття та принцип дії вказівників.</p> <p>Діяльнісна складова</p> <p>Використовує можливості середовища програмування для створення та налагодження програм.</p> <p>Складає і виконує власні тестові набори та підготовані іншими.</p> <p>Розв'язує задачі з використанням усіх базових алгоритмічних структур та їх комбінацій.</p> <p>Використовує змінні різних типів та обґрунтовує вибір типів даних.</p> <p>Розробляє як консольні програми, так і програми з графічним інтерфейсом.</p> <p>Використовує програмні об'єкти, програмує</p>	<p>Мова програмування. Класифікація та складові мов програмування. Особливості середовища розробки.</p> <p>Структура програмного проекту.</p> <p>Основні елементи мови програмування.</p> <p>Використання змінних і виразів.</p> <p>Реалізація базових алгоритмічних конструкцій.</p> <p>Логічні вирази. Таблиці істинності.</p> <p>Функції. Параметри.</p> <p>Поняття рекурсії.</p> <p>Рекурсивні функції.</p> <p>Вказівники.</p> <p>Поняття структур даних, масив, список, словник, стек, черга, хеш-таблиця.</p> <p>Класифікація структур даних.</p> <p>Лінійні структури даних.</p> <p>Способи реалізації структур даних.</p> <p>Застосування на практиці різних структур даних.</p> <p>Бібліотеки мови програмування.</p> <p>Створення, редагування та тестування консольних програм і програм з графічним інтерфейсом.</p> <p>Елементи об'єктно-орієнтованого програмування.</p> <p>Правила написання читабельного коду.</p> <p>Коментарі у тексті програми.</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p>обробники подій.</p> <p>Використовує бібліотеки, а також підпрограми чи модулі, розроблені самостійно та іншими, у власних проектах.</p> <p>Застосовує метод функціональної декомпозиції задачі.</p> <p>Використовує рекурсію для програмування обчислень за рекурентними формулами та обробки структур даних.</p> <p>Коректно оголошує та використовує лінійні структури даних для реалізації алгоритмів мовою програмування.</p> <p>Знає і програмує всі базові алгоритми обробки лінійних структур даних, такі як алгоритми вставки, видалення, пошуку елементів, сортування тощо.</p> <p>Розробляє алгоритми розв'язування практичних завдань з використанням різних структур даних.</p> <p>Де потрібно, використовує вказівники для роботи з лінійними структурами даних.</p> <p>Ціннісна складова</p> <p>Усвідомлює роль програмування та моделювання для розв'язання навчальних та життєвих задач.</p> <p>Оцінює відповідність результатів виконання програми поставленій задачі.</p> <p>Оцінює доцільність застосування методів програмування для розв'язання конкретної задачі.</p> <p>Дотримується правил написання читабельного коду та коментарів до нього, пояснює код іншим.</p> <p>Перевіряє, висуває гіпотези, критикує, виявляє недоліки розроблених алгоритмів і програм.</p> <p>Обґрунтовує доцільність використання та особливості різних структур даних для розв'язання конкретних задач.</p>	
11 клас	
АЛГОРИТМИ	
<p>Знаннєва складова</p> <p>Знає методи проектування алгоритмів.</p> <p>Знає і розуміє базові алгоритми.</p> <p>Пояснює структуру алгоритму та реалізує його засобами мови програмування.</p> <p>Діяльнісна складова</p> <p>Реалізує базові алгоритми засобами мови програмування.</p>	<p>Методи проектування алгоритмів. Методи представлення алгоритмів. Кодування алгоритмів. Поняття складності алгоритмів.</p> <p>Основні поняття теорії чисел:</p> <ul style="list-style-type: none"> - системи числення - робота з великими числами - факторизація чисел <p>Алгоритми сортування. Квадратичні алгоритми сортування. Сортування вставками, сортування</p>

Очікувані результати навчально-пізнавальної діяльності учнів	Зміст навчального матеріалу
<p>Планує процес розв'язування задачі з використанням програмування.</p> <p>Створює та налагоджує програми за розробленими алгоритмами.</p> <p>Розв'язує задачі з використанням базових алгоритмів.</p> <p>Обґрунтовує вибір алгоритму для розв'язування задачі.</p> <p>Ціннісна складова</p> <p>Оцінює складність алгоритмів.</p> <p>Обґрунтовує доцільність вибору певного алгоритму. Оцінює практичне значення та ефективність програм, створених за базовими алгоритмами. Розпізнає задачі, для розв'язання яких доцільно використовувати базові алгоритми.</p>	<p>підрахунком, сортування злиттям</p> <p>Алгоритми пошуку. Бінарний пошук, тернарний пошук, пошук з поверненням.</p> <p>Обробка рядків. Основні поняття теорії графів.</p> <p>Способи представлення графів. Пошук у ширину та глибину; визначення найкоротшого шляху в графі, алгоритм Дейкстри, алгоритм Флойда-Уоршелла.</p> <p>Динамічне програмування. Жадібні алгоритми.</p> <p>Базові поняття обчислювальної геометрії.</p> <p>Векторний добуток; напрямок повороту; визначення площі многокутника; побудова опуклої оболонки.</p>

Додаток Д

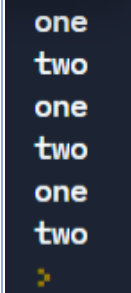
Пам'ятка з основ структурного програмування мовою Python

Загальні принципи оформлення програми	
Кінець рядка є кінцем інструкції (крапка з комою не потрібна)	
Вкладені інструкції об'єднуються в блоки за величиною відступів	
Відступ може бути будь-яким, головне, щоб в межах одного вкладеного блоку відступ був однаковий	
Відступ в 1 пробіл, наприклад, не найкраще рішення. Використовуйте 4 пробіли	
Вкладені інструкції в Python записуються за одним і тим же шаблоном, а саме – основна інструкція завершується двокрапкою, слідом за якою розташовується вкладений блок коду, зазвичай з відступом під рядком основної інструкції.	
Іноді декілька інструкцій можна записувати в одному рядку, розділяючи їх крапкою з комою, але краще цього не робити	
Вказівка	Опис, пояснення
Типи даних, які можуть мати об'єкти у мові Python	
int	цілі числа, розмір числа обмежений лише обсягом оперативної пам'яті
float	дійсні числа
complex	комплексні числа
str	Unicode-рядки
bool	логічний тип даних; може містити значення True або False, що ведуть себе як числа 1 і 0 відповідно.
Вказівка	Опис, пояснення
Операції порівняння, що використовуються в логічних виразах	
==	дорівнює
!=	не дорівнює
<	менше
>	більше
<=	менше або дорівнює
>=	більше або дорівнює
in	перевірка на входження до послідовності
is	перевіряє, чи посилаються дві змінні на один і той же об'єкт
Вказівка	Опис, пояснення
Оператор розгалуження	
if <u>умова</u>: <u>дія1</u> else: <u>дія2</u>	оператор розгалуження дозволяє в залежності від значення логічного виразу (умови) виконати окрему ділянку програми або, навпаки, не виконувати її.
if <u>умова1</u>: <u>дія1</u>	множинне розгалуження

elif <u>умова2</u> : <u>дії2</u>	
elif <u>умова3</u> : <u>дії3</u>	
else: <u>дії3</u>	

Вказівка	Опис, пояснення
Функції	
range()	Функція range() має такий вигляд: range (початкове значення, кінцеве значення) Якщо не вказано, то за замовчуванням використовується значення 0. Зауважимо, що кінцеве значення не входить до значень, які повертаються. Якщо параметр не вказано, то використовується значення 1
range(n)	шкала чисел від 0 до n-1
range(k, n)	шкала чисел від k до n-1
range(k, n, m)	шкала чисел від k до n-1 з кроком m (при чому m може бути від'ємним)

Вказівка	Опис, пояснення
Цикл/повторення	
for <u>змінна</u> in <u>множина</u> : <u>дія1</u> <u>діяN</u>	Дії повторяться стільки разів, скільки елементів у множині
while <u>умова</u> : <u>дія1</u> <u>діяN</u>	Поки умова істинна дії повторюються. У блоці операцій можуть бути використані: - <i>break</i> для дострокового переривання циклу; - <i>continue</i> для початку наступного проходу циклу, минаючи команди тіла циклу, що не виконувалися

Вказівка	Опис, пояснення
Функції	Щоб блок операцій можна було використовувати багаторазово, команди об'єднують у функції.
Функція без параметрів def func(): <u>дія1</u> <u>діяN</u> return <u>результат</u> * *вказується результат – змінна або функція; може не використовуватися	def output(): print('one') print('two') output() output() output() Результат: 

Вказівка	Опис, пояснення
<p>Функція з параметрами</p> <pre>def <u>назва</u> ([<u>змінні</u>*]):</pre> <p><u>дія1</u></p> <p><u>діяN</u></p> <p>return <u>результат</u>*</p> <p>* вказується результат – змінна або функція</p>	<pre>def sum(x, y, z=7): return x+y+z</pre> <p>r=sum(10, 20)</p> <p>print(r) #буде виведено число 37</p>

Додаток Е

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Список публікацій Л. В. Легкої за темою «Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв»

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Легка Л. В. Пропедевтика вивчення квантової інформатики у профільній (старшій) школі / Л. В. Легка, С. В. Шокалюк, Є. Ю. Богуненко // Фізико-математична освіта. – 2021. – Том 28. – № 2. – С. 51–56. – DOI : 10.31110/2413-1571-2021-028-2-009.

2. Легка Л. В. Основи квантових технологій у закладах загальної середньої освіти: обумовленість та забезпеченість / Л. В. Легка // Освітній дискурс. – 2021. – Випуск 35 (7). – С. 61–72. – DOI : 10.33930/ed.2019.5007.35(7)-6.

3. Lehka L. V. Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to lyceums students / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Educational Dimension. – 2021. – Issue 4 (56). – P. 102-121. – DOI : 10.31812/educdim.v56i4.4440.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Lehka L. V. Quantum programming is a promising direction of IT development / Liudmyla V. Lehka, Svitlana V. Shokaliuk // Computer Science & Software Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018), Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018 / Edited by : Arnold E. Kiv, Serhiy O. Semerikov, Vladimir N. Soloviev, Andrii M. Striuk. – P. 76–82. – (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2292). – Access mode : <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper07.pdf>

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

5. Легка Л. Поточний стан і перспективи розвитку методичної системи навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти України / Людмила Легка // Збірник наукових праць здобувачів вищої освіти Криворізького

державного педагогічного університету (приурочено до 90-річчя КДПУ) / Міністерство освіти і науки України, Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг, 2020. – С. 67–70.

Таблиця Е.1

**Відомості про апробацію результатів дисертації Л. В. Легкої
за темою «Методика навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв»**

Назва заходу	Місце, установа, дата	Форма апробації
1st Student Workshop Computer Science & Software Engineering (CS&SE@SW 2018)	Кривий Ріг, Криворізький національний університет, 2018 р.	заочна
II Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в освіті та науці»	Мелітополь, Мелітопольський державний педагогічний університеті імені Богдана Хмельницького, 2021 р.	очна

Додаток Ж

Довідки про упровадження результатів дослідження

1. Криворізька загальноосвітня школа І–ІІІ ступенів № 1.
2. Криворізька спеціалізована школа І–ІІІ ступенів № 9 з поглибленим вивченням економіки, права та іноземних мов.
3. Криворізька загальноосвітня школа І–ІІІ ступенів № 90.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
 ДЕПАРТАМЕНТ ОСВІТИ І НАУКИ ВИКОНКОМУ КРИВОРІЗЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ
 ВІДДІЛ ОСВІТИ ВИКОНКОМУ ЦЕНТРАЛЬНО-МІСЬКОЇ РАЙОННОЇ У МІСТІ РАДИ
 Криворізька загальноосвітня школа І-ІІІ ступенів № 1
 вул. Чкалова, 1 ж, м. Кривий Ріг 50000, телефон: (097) 6997565, e-mail: tagieva7@i.ua

04.10.2021 № 836а

На № _____ від _____

ДОВІДКА
про впровадження результатів
дисертаційної роботи Л. В. Легкої в освітній процес
Криворізької загальноосвітньої школи І-ІІІ ступенів №1
Криворізької міської ради Дніпропетровської області

Результати дослідження були апробовані та впроваджені в освітній процес Криворізької загальноосвітньої школи І-ІІІ ступенів № 1 з 2018-2019 н.р. на уроках інформатики. Пропонована методика полягає у формуванні компетентностей з основ квантової інформатики: сприяє розумінню фізичних і математичних основ роботи квантових комп'ютерів та свідомому виконанню учнями квантових алгоритмів на квантових симуляторах і комп'ютерах як комп'ютерах нового покоління.

Результати впровадження методики навчання основ квантової інформатики, розробленої Л. В. Легкою, показали її ефективність у процесі навчання інформатики. Особливо слід відзначити міжпредметний характер змісту курсу «Основи квантової інформатики» – використання знань з інформатики, фізики, математики.

Директор



Лариса МИЦИК

**Криворізька спеціалізована школа №9
з поглибленим вивченням економіки, права та іноземних мов
Криворізької міської ради Дніпропетровської області**

вул. Дніпровське шосе, 32, м. Кривий Ріг, 50048, тел. (0564) 470-10-05
e-mail: school9_KR@i.ua, код ЄДРПОУ 26458848

Від_13.10.2021_ № 563/1

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів
дисертаційної роботи Л. В. Легкої в освітній процес
Криворізької спеціалізованої школи I-III ступенів №9 з поглибленим
вивченням економіки, права та іноземних мов
Криворізької міської ради Дніпропетровської області

Впровадження результатів дослідження в освітній процес Криворізької спеціалізованої школи I-III ступенів №9 з поглибленим вивченням економіки, права та іноземних мов здійснюється на уроках інформатики з 2019-2020 н.р. Запропонована методика навчання основ квантової інформатики ґрунтується на зв'язках інформатичної освітньої галузі з визначеними в Державному стандарті базової середньої освіти ключовими компетентностями – інформаційно-комунікаційної, математичної, компетентності у галузі природничих наук, техніки і технологій, інноваційності, соціальних компетентностей.

Упровадження основ квантової інформатики дозволило ознайомити учнів з проривними науковими досягненнями в галузі квантових технологій.

Розроблена методика має міжпредметний характер (інформатика, фізика, математика), подання матеріалу орієнтоване на учнів 10-11 класів за чотирима змістовими лініями: фізичні та математичні основи квантової інформатики; квантовий комп'ютер, особливості будови та функціонування; побудова та реалізація квантових алгоритмів за допомогою схем; реалізація квантових алгоритмів мовою програмування.

В. о. директора



Інеса Лозівець
Інеса Лозівець

Криворізька загальноосвітня школа І-ІІІ ступенів №90
Криворізької міської ради Дніпропетровської області

вул. Кокчетавська, 1А, м. Кривий Ріг, 50055, тел. 0671025659,

e-mail: school-90@ukr.net Код ЄДРПОУ 20221281

Від 18.10.2021 № 01-07/236

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Л. В. Легкої
в освітній процес

Криворізької загальноосвітньої школи І-ІІІ ступенів №90
Криворізької міської ради Дніпропетровської області

Результати дослідження були апробовані та впроваджені в освітній процес Криворізької загальноосвітньої школи І-ІІІ ступенів №90 з 2018-2019 н.р. Л. В. Легкою на уроках інформатики, з 2020-2021 н.р. – на заняттях гуртка інформаційно-технологічного профілю. Пропонована програма «Основи квантової інформатики» дозволяє ознайомити учнів з досягненнями сучасності, перспективами розвитку новітніх технологій, показати значущість знань з фізики й математики для розвитку квантової галузі як технології майбутнього.

Розроблений курс дозволяє поглибити знання учнів з інформатики, фізики, математики, показує сфери застосування квантових комп'ютерів й особливості їх застосування, навчитися використовувати квантові комп'ютери і симулятори через хмарних доступ для розв'язання квантових алгоритмів.

Директор



Ян Довгий
Ян Довгий

Додаток К

Критерії та показники рівнів сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявлень, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
1. Компетентності з фізичних основ квантових технологій						
1	СГК01.01	знання основних понять квантової фізики ($A_{1m} = 139$)				
2	СГК01.02	уміння визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах ($A_{1m} = 115$)				
3	СГК01.03	уміння подавати кубіт на сфері Блоха ($A_{1m} = 92$)				
2. Компетентності з математичних основ квантової інформатики						
4	СГК02.01	знання основ теорії комплексних чисел ($A_{1m} = 144$)				
5	СГК02.02	знання основ лінійної алгебри ($A_{1m} = 156$)				
6	СГК02.03	знання математичних основ квантової фізики ($A_{1m} = 156$)				
7	СГК02.04	знання статистичної природи квантових вимірювань ($A_{1m} = 148$)				
8	СГК02.05	уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації ($A_{1m} = 134$)				
9	СГК02.06	уміння оперувати із стандартними базисами ($A_{1m} = 137$)				

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявленнь, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
10	СГК02.07	уміння подавати вектор у обраному базисі ($A_{1m} = 128$)				
11	СГК02.08	уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними ($A_{1m} = 132$)				
3. Компетентності із забезпечувальних технологій						
12	СГК03.01	знання оптичних технологій ($A_{1m} = 128$)				
13	СГК03.02	знання лабораторних технологій ($A_{1m} = 126$)				
14	СГК03.03	знання експериментального управління ($A_{1m} = 130$)				
15	СГК03.04	уміння розрізняти джерела фотонів ($A_{1m} = 128$)				
4. Компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків						
16	СГК04.01	знання будови пристроїв на основі спіну (зокрема, напівпровідникових квантових точок; $A_{1m} = 111$)				
17	СГК04.02	знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням ($A_{1m} = 111$)				
18	СГК04.03	уміння описувати типові структури квантових комп'ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи ($A_{1m} = 134$)				

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявлення, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
19	СГК04.04	уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів ($A_{1m} = 126$)				
20	СГК04.05	уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах ($A_{1m} = 125$)				
5. Компетентності з квантових обчислень та моделювання						
21	СГК05.01	знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатобітних; $A_{1m} = 105$)				
22	СГК05.02	знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних; $A_{1m} = 120$)				
23	СГК05.03	знання базових квантових алгоритмів (Шора, Гровера, квантової оптимізації, оцінки квантової фази, квантової лінійної алгебри, квантового блукання та інших; $A_{1m} = 119$)				
24	СГК05.04	уміння записувати квантові вентиля за допомогою унітарних матриць ($A_{1m} = 110$)				
25	СГК05.05	уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви; $A_{1m} = 116$)				

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявлень, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
26	СГК05.06	уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентиля Тоффолі та Фредкіна; $A_{1m} = 122$)				
27	СГК05.07	уміння застосовувати квантові вентилялі для запису квантових алгоритмів ($A_{1m} = 123$)				
28	СГК05.08	здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування ($A_{1m} = 130$)				
29	СГК05.09	уміння реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.; $A_{1m} = 117$)				
30	СГК05.10	уміння працювати із квантовими симуляторами ($A_{1m} = 117$)				
6. Компетентності з квантових датчиків та метрології						
31	СГК06.01	знання галузей застосування квантових датчиків ($A_{1m} = 124$)				
32	СГК06.02	уміння наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях ($A_{1m} = 130$)				
7. Компетентності з квантової комунікації						

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявлення, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
33	СГК07.01	знання квантової криптографії (квантового розподілу ключа, безпечної автентифікації, цифрових підписів, галузей застосування; $A_{1m} = 122$)				
34	СГК07.02	знання про квантові мережі (квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі; $A_{1m} = 133$)				
35	СГК07.03	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; $A_{1m} = 130$)				
36	СГК07.04	уміння описувати принципи роботи та будову обладнання квантових мереж ($A_{1m} = 129$)				
37	СГК07.05	уміння наводити приклади застосування квантової криптографії у різних галузях ($A_{1m} = 125$)				
8. Практичні навички та загальні компетенції						
38	СГК08.01	знання основ класичного (неквантового) програмування: мов програмування, алгоритмів, класів складності, криптографії ($A_{1m} = 133$)				

№	Шифр	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	ПОКАЗНИКИ			
			0 (для <i>знань</i> – не має навіть уявлень, для <i>умінь</i> – не демонструє)	1 (для <i>знань</i> – має певні уявлення, для <i>умінь</i> – частково демонструє)	2 (для <i>знань</i> – має нестійкі знання, для <i>умінь</i> – демонструє, припускається помилок)	3 (для <i>знань</i> – має стійкі знання, для <i>умінь</i> – впевнено, безпомилково демонструє)
39	СГК08.02	знання галузей застосування квантових технологій ($A_{1m} = 136$)				
40	СГК08.03	уміння реалізовувати базові класичні алгоритми (зокрема, криптографічні) мовами програмування ($A_{1m} = 126$)				
41	СГК08.04	уміння наводити приклади використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги ($A_{1m} = 124$)				

Додаток Л

Дорожня карта авторської методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
1. Компетентності з фізичних основ квантових технологій						
1	знання основних понять квантової фізики	ЗЛ.ОКІ.01	1			
2	уміння визначати, чи знаходяться кубіти у пов'язаних (заплутаних) станах	ЗЛ.ОКІ.01	6		IBM Quantum Composer	
3	уміння подавати кубіт на сфері Блоха	ЗЛ.ОКІ.01	3	4		
2. Компетентності з математичних основ квантової інформатики						
4	знання основ теорії комплексних чисел	ЗЛ.ОКІ.01	4			MathWay
5	знання основ лінійної алгебри	ЗЛ.ОКІ.01	2	3, 4		MathWay LO Calc
6	знання математичних основ квантової фізики	ЗЛ.ОКІ.01	3			
7	знання статистичної природи квантових вимірювань	ЗЛ.ОКІ.01	3			
8	уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації	ЗЛ.ОКІ.01	3	4		
9	уміння оперувати із стандартними базисами	ЗЛ.ОКІ.01	2	3		
10	уміння подавати вектор у	ЗЛ.ОКІ.01	2	3		

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
	обраному базисі					
11	уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними	ЗЛ.ОКІ.01	2	3 4		MathWay LO Calc
3. Компетентності із забезпечувальних технологій						
12	знання оптичних технологій	ЗЛ.ОКІ.02	10	16, 17*		
13	знання лабораторних технологій	ЗЛ.ОКІ.02	10	16, 17*		
14	знання експериментального управління	ЗЛ.ОКІ.02	10	16, 17*		
15	уміння розрізнати джерела фотонів	ЗЛ.ОКІ.02	10	16, 17*		
4. Компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків						
16	знання будови пристроїв на основі спіну (зокрема, напівпровідникових квантових точок)	ЗЛ.ОКІ.02	1			
17	знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 9, 11-15		
18	уміння описувати типові структури квантових комп'ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи	ЗЛ.ОКІ.02	1			
19	уміння налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 9, 11-15		

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
20	уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 9, 11-15		
5. Компетентності з квантових обчислень та моделювання						
21	знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних)	ЗЛ.ОКІ.02	3	4, 5, 6, 8, 9, 11-15	IBM Quantum Composer	*logic.ly Qlogic Hello, Quantum
22	знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних)	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 9, 11-15		
23	знання базових квантових алгоритмів (Шора, Гровера, квантової оптимізації, оцінки квантової фази, квантової лінійної алгебри, квантового блукання та інших)	ЗЛ.ОКІ.02	6	8	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
24	уміння записувати квантові вентиля за допомогою унітарних матриць	ЗЛ.ОКІ.02	3	4, 5		MathWay
25	уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви)	ЗЛ.ОКІ.02	3	4, 5, 6, 8	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
26	уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентилі Тоффолі та Фредкіна)	ЗЛ.ОКІ.02	5	6, 8, 9	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
27	уміння застосовувати квантові вентилі для запису квантових алгоритмів	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 11-15	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
28	здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 11-15	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
29	уміння реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.)	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 11-15	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
30	уміння працювати із квантовими симуляторами	ЗЛ.ОКІ.02	6	8, 11-15	IBM Quantum Composer IBM Quantum Lab	
6. Компетентності з квантових датчиків та метрології						
31	знання галузей застосування квантових датчиків	ЗЛ.ОКІ.02	1	16, 17*		

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
32	уміння наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях	ЗЛ.ОКІ.02	1	16, 17*		
7. Компетентності з квантової комунікації						
33	знання квантової криптографії (квантового розподілу ключа, безпечної автентифікації, цифрових підписів, галузей застосування)	ЗЛ.ОКІ.03	10	16, 17*		
34	знання про квантові мережі (квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі)	ЗЛ.ОКІ.03	10	16, 17*		
35	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)	ЗЛ.ОКІ.03	10	16, 17*		
36	уміння описувати принципи роботи та будову обладнання квантових мереж	ЗЛ.ОКІ.03	10	16, 17*		
37	уміння наводити приклади застосування квантової криптографії у різних галузях	ЗЛ.ОКІ.03	10	16, 17*		

№	Складові (знання, уміння) групи компетентностей	Змістова лінія	Номер уроку (за таблицею 2.20), на якому ФОРМУЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Номери уроків (за таблицею 2.20), на яких УДОСКОНАЛЮЄТЬСЯ складова групи компетентностей	Апаратно-програмна підтримка	
					основні	додаткові
8. Практичні навички та загальні компетенції						
38	знання основ класичного (неквантового) програмування: мов програмування, алгоритмів, класів складності, криптографії	ЗЛ.ОКІ.02	–	7	Google Colab	
39	знання галузей застосування квантових технологій	ЗЛ.ОКІ.02	1	7, 16, 17		
40	уміння реалізувати базові класичні алгоритми (зокрема, криптографічні) мовами програмування	ЗЛ.ОКІ.02	–	7	Google Colab	
41	уміння наводити приклади використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги	ЗЛ.ОКІ.02	1	16, 17		

Додаток М

Вхідне тестування-опитування слухачів факультативного курсу

«Основи квантової інформатики»

Вітання слухачам факультативного курсу!

Вхідне тестування-опитування необхідне для збирання даних щодо Вашої початкової обізнаності в окремих питаннях квантової інформатики. За цими даними, по завершенню навчання, набуті результати кожного слухача можна буде проаналізувати на предмет успішності.

Серед питань є обов'язкові* та додаткові (уточнюючі). Відповіді на додаткові питання мають надати ті слухачі, які у попередніх питаннях обрали варіанти відповідей рівнів 2 та 3.

Успіхів!

1. Для чого (або через що) Ви починаєте вивчати основи квантової інформатики?

- змушений реагувати на рішення більшості, що в цьому є потреба
- люблю навчатися будь-чому у школі
- природня цікавість до інновацій без занурення у тонкощі
- бажання отримати стартові знання та уміння для майбутньої професійної діяльності у сфері ІТ
- розпочав/здійснив самонавчання за курсами даної галузі - гарна нагода обмінятися досвідом

2. Знання та уміння яких предметних (освітніх) галузей є фундаментом квантових технологій?

- виключно інформатики
- виключно фізики
- інформатики та фізики

фізики, математики та інформатики

3. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях квантової механіки:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

4. Запишіть основні явища квантової механіки та надайте тлумачення будь-яких ДВОХ:

Ваша відповідь _____

5. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях теорії комплексних чисел:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

6. Запишіть 4 комплексні числа, що розміщуються у різних чвертях комплексної площини:

Ваша відповідь _____

7. Оберіть рівень Вашої обізнаності у теорії та практиці роботи з векторами:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

8. Запишіть основні дії на векторами:

Ваша відповідь _____

9. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях теорії та практики роботи з матрицями:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

10. Що Ви можете зазначити про особливості виконання дії множення двох матриць?

Ваша відповідь _____

11. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях бра-кет нотації:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

12. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях оптичних та лабораторних технологій, а також експериментального управління:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

13. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях квантових обчислювальних пристроїв:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів

- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

14. У чому на Вашу думку полягають переваги та недоліки здійснення розрахунків за допомогою квантових комп'ютерів?

Ваша відповідь _____

15. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях реалізації квантових алгоритмів:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення) або уміння
- 3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

16. У якому квантовому алгоритмі, що Ви реалізовували, використовується найбільша кількість вентилів? У чому призначення такого алгоритму? Наведіть фрагмент програмного коду його реалізації та прокоментуйте:

Ваша відповідь _____

17. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях застосування квантових датчиків у метрології та інших галузях:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення)

18. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях квантових телекомунікаційних технологій:

- 0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)
- 1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів
- 2 - маю певні знання (уявлення)

3 - знаю основний клас задач і можу розв'язати деякі з них

19. Чим квантові протоколи надійніші за традиційні? Які квантові протоколи Вам відомі. Який квантовий протокол було відкрито першим? Наведіть короткий опис одного з протоколів:

Ваша відповідь _____

20. Оберіть рівень Вашої обізнаності у питаннях класичного (неквантового) програмування мовою Python:

0 - ніколи не чув (не цікавився, не вивчав)

1 - цікавився, але самостійно мало що зрозумів

2 - маю певні знання (уявлення)

3 - знаю основні алгоритми та вмію реалізувати деякі з них

21. Навести фрагмент будь-якого класичного алгоритму та прокоментувати його:

Ваша відповідь _____

Додаток Н
Технологічна карта уроку № 5 з основ квантової інформатики

Тема уроку	Квантові логічні вентиля Адамара та контрольованого заперечення. Розв'язання задач
Мета уроку	<p><i>навчальна:</i> засвоїти призначення квантових логічних вентилів Адамара та контрольованого заперечення, поняття квантової суперпозиції, математичне подання вентилів Адамара та контрольованого заперечення; набути уміння реалізовувати найпростіші квантові схеми із застосуванням вентилів Адамара та контрольованого заперечення;</p> <p><i>розвивальна:</i> розвивати логічне та алгоритмічне мислення, пам'ять, увагу;</p> <p><i>виховна:</i> виховувати дбайливе ставлення до комп'ютерної техніки, повагу до роботи товаришів (однокласників, гуртківців), уміння самоорганізації та саморефлексії, раціонального розподілу навчального часу, культуру цифрової поведінки: висловлювати свою точку зору, вести діалог через спільні онлайн-сервіси, формувати здатність до позитивного співробітництва, прагнення до збереження здоров'я, зважаючи на його цінність і значимість</p>
Очікувані результати	<p>знає призначення вентилів Адамара та контрольованого заперечення;</p> <p>має уявлення про зміст квантової суперпозиції;</p> <p>описує вентиля Адамара та контрольованого заперечення за допомогою відповідних унітарних матриць;</p> <p>використовує вентиля Адамара та контрольованого заперечення для побудови квантових схем;</p> <p>інтерпретує результати застосування вентилів Адамара та контрольованого заперечення, співставляє їх із результатами однокласників (гуртківців);</p> <p>розв'язує задачі різного рівня складності на застосування вентилів X, Y, Z, Адамара та контрольованого заперечення за допомогою Інтернет-сервісу IBM Quantum Composer та мобільного застосунку QLogic</p>
Міжпредметні зв'язки	алгебра, фізика, англійська мова
Тип уроку	комбінований
Обладнання уроку	комп'ютери з доступом до мережі Інтернет, смартфон (планшет),
Дидактичні засоби	презентація, інтерактивні вправи, система навчальних завдань для практичного виконання
Програмне забезпечення	браузер, QLogic (для мобільних пристроїв)

Компетентності, що формуються/розвиваються на уроці:

ключові:

- математична – поглиблюються знання з основ лінійної алгебри (дії з матрицями);
- у галузі природничих наук, техніки і технологій – усвідомлюються квантові явища (суперпозиції);
- соціальна – створюються умови для переходу до використання нових технологій – квантових;

предметні (спеціальні):

– квантові обчислення та моделювання – знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних); уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви); уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів.

Реалізація наскрізних змістових ліній:

– здоров'я і безпека: становлення учня як емоційно стійкого члена суспільства, здатного брати на себе відповідальність за розв'язання поставлених задач;

– підприємливість і фінансова грамотність: розв'язання практичних задач щодо реальної оцінки власних можливостей, націлена на розвиток лідерських ініціатив, забезпечення впевненості у своїх силах бути конкурентоспроможним на ринку праці.

Хід уроку

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
Організаційний момент (2 хв.) Організація навчального простору учнів і вчителя. Інструктаж з БЖД. Створення позитивного		перевіряє готовність комп'ютерної техніки та наявність під'єднання до мережі Інтернет; перевіряє готовність учнів до уроку; налаштовує на плідну роботу	готують робочі місця, шкільне приладдя; входять у робочі акаунти Google	

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
емоційного настрою учасників освітнього процесу				
Мотивація навчальної діяльності (2 хв.) Формування внутрішньої потреби учнів у включенні в навчальну діяльність.	зображення- мотиватор; інтерактивна вправа «Продовжи вислів» фронтально	через практикоорієнтоване завдання створює умови для формування внутрішньої потреби учнів у включенні в навчальну діяльність	відповідають на питання вправи (завдання)	презентація https://learningapps.org/ watch?v=pp0tsrvs222
Повідомлення теми та мети (2 хв.) Розгадування ребусу	інтерактивна гра «Розгадай ребус» фронтально	демонструє презентацію, спостерігає за процесом розгадуванням ребусу в реальному часі	розгадують ребус, визначають тему уроку, формулюють мету уроку	презентація
Актуалізація опорних знань (3 хв.) Відтворення знань,	діяльнісний метод, інтерактивні вправи на	організовує звернення до інтерактивних вправ на індивідуальних робочих місцях	виконують вправи; виконують роботу над допущеними помилками, якщо вони є	https://learningapps.org/ watch?v=pyq0ngsfk22 https://learningapps.org/ view23541948

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
що потрібні для подальшої роботи на уроці	встановлення відповідності фронтально			https://learningapps.org/watch?v=pq596f3j322
Вивчення нового навчального матеріалу (20 хв.) Сприйняття і первинне усвідомлення нового матеріалу	демонстрація, пояснення, діяльнісний метод, бесіда	демонструє презентацію, пояснює зміст принципу суперпозиції	сприймають/усвідомлюють пояснення вчителя, формулюють уточнюючі запитання	презентація
	фронтально	демонструє презентацію, пояснює призначення вентиля Адамара, демонструє матричне представлення вентиля Адамара та його дію на кети $ 0\rangle$ та $ 1\rangle$; *пропонує переконатися в оборотності	сприймають/усвідомлюють пояснення вчителя, формулюють уточнюючі запитання *швидковстигаючі (допитливі) учні перевіряють оборотність вентиля Адамара вручну та/або за допомогою універсальної системи комп'ютерної математики	презентація * https://www.mathway.com/
		працює у IBM Quantum Composer, демонструє застосування вентиля Адамара на кубіти в обох базових станах,	спостерігають, відтворюють дії, продемонстровані вчителем, озвучують отримані результати за вимогою вчителя	https://quantum-computing.ibm.com/

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
		інтерпретує отримані результати без вимірювання та після нього, організовує перевірку результатів окремо взятих учнів (формує/розвиває уявлення про статистичну природу квантових обчислень)		
		демонструє презентацію, пояснює призначення вентиля контрольованого заперечення, демонструє його матричне представлення та дію на два кети у різних станах; *пропонує переконатися в оборотності	сприймають/усвідомлюють пояснення вчителя, формулюють уточнюючі запитання *швидковстигаючі (допитливі) учні перевіряють оборотність вентиля контрольованого заперечення вручну та/або за допомогою універсальної системи комп'ютерної математики	презентація * https://www.mathway.com/
		працює у IBM Quantum Composer, демонструє	спостерігають, відтворюють дії, продемонстровані вчителем,	https://quantum-computing.ibm.com/

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
		застосування вентиля контрольованого заперечення на два кубіти у різних комбінаціях базових станів, інтерпретує отримані результати без вимірювання та після нього	озвучують отримані результати за вимогою вчителя	
Перевірка первинного засвоєння знань (2 хв.)	фронтальне опитування	запитує про призначення, математичне подання та особливості використання вентилів Адамара та контрольованого заперечення, акцентуючи увагу на можливих помилках; вибірково перевіряє схеми, побудовані учнями	відповідають на питання, за вимогою вчителя коментують побудовані схеми та результати їх запуску	https://quantum-computing.ibm.com/
Фізкультпауза (1 хв.)		демонструє комплекс вправ для очей	виконують вправи	
Розв'язання задач (10 хв.)	метод вправ	надає інструкції щодо розв'язання завдань	виконують навчальні завдання	https://quantum-computing.ibm.com/

Етап уроку, зміст (час)	Методи та форми роботи	Діяльність вчителя	Діяльність учнів	Електронні освітні ресурси (покликання, додаток)
	фронтально-індивідуально	за допомогою електронних освітніх ресурсів; відстежує та контролює правильність виконання вправ; фіксує дії учнів, за необхідності виправляє помилки та надає рекомендації		QLogic
Рефлексія навчальної діяльності (2 хв.) Рефлексія і самооцінка учнями власної навчально-пізнавальної діяльності та емоційного стану	групова робота на віртуальній дошці	організовує віртуальну дошку в реальному часі для отримання зворотного зв'язку за питаннями («Що було ключовим на уроці?», «Чого не зрозуміли?», «Що було найлегшим?», «Загальні враження від уроку»)	фіксують на віртуальній дошці відповіді на окремі поставлені питання	https://padlet.com/
Підведення підсумків уроку (1 хв.)	бесіда фронтально	надає узагальнюючі коментарі	завершують роботу із комп'ютером; чекають на повідомлення від вчителя	

Презентація до уроку № 5 «Квантові логічні вентиля Адамара та контрольованого заперечення. Розв’язання задач»

Урок №5
Квантові логічні вентиля Адамара та контрольованого заперечення.
Розв’язання задач

Факультативний курс "Основи квантової інформатики" для учнів ліцеїв

Принцип суперпозиції: якщо частинка може перебувати у певних станах, то вона може одночасно перебувати у кожному з них.

Принцип суперпозиції

Чому ти адже? У тебе ж скінченна інформаційність...

Мово, коли ти мене не побачив в якому був тут і на зразок: в суперпозиції.

Навчання ніколи не вичерпує розум.
Леонардо да Вінчі

<https://learningapps.org/watch?v=pp0trvs222>

Квантові логічні вентиля Адамара та контрольованого заперечення CNOT

Повторимо:

<https://learningapps.org/view23541948> <https://learningapps.org/watch?v=pc59KDJ32> <https://learningapps.org/watch?v=sva0ue8922>

Вентиль Адамара

переводить кубіт у стан суперпозиції та може виводити кубіт із стану суперпозиції без вимірювання

Адамара виконує комбіноване обертання на π радіан навколо вісі x та на $\pi/2$ навколо вісі y.

1 = A

Багато понять носять ім'я видатного математика Жака Адамара (Jacques Hadamard). Хоча у дитинстві йдучи з батьком повз один із найпрестижніших навчальних закладів Франції Еколь Нормаль (Ecole normale supérieure), малолітній Жак Адамар запитав: «Це тут вивчають математику? Ну, тоді я сюди не піду».

Ось про такий парадоксальний випадок відомо з біографії генія математики, що з дитинства обожнював читання, захоплювався музикою, мовами і ботанікою й не любив розв'язувати арифметичні задачі.

Вентиль Адамара

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H}$$

представлення:

бра-кет $|0\rangle(|+\rangle + |-\rangle)$
хвильова функція $H|\psi\rangle = \alpha|+\rangle + \beta|-\rangle = \frac{\alpha+\beta}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{\alpha-\beta}{\sqrt{2}}|1\rangle$

застосування:

$H|0\rangle = |+\rangle$
 $H|1\rangle = |-\rangle$

Вентиль Адамара

$$H|1\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1}{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0 + (-\frac{1}{\sqrt{2}}) \cdot 1}\right) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$H|0\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0}{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 1 + (-\frac{1}{\sqrt{2}}) \cdot 0}\right) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

*Для допитливих: виконайте зворотнє перетворення

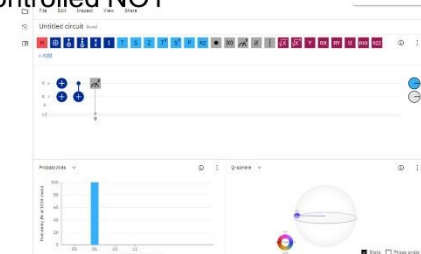
Вентиль контрольованого заперечення Controlled NOT

$$CX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



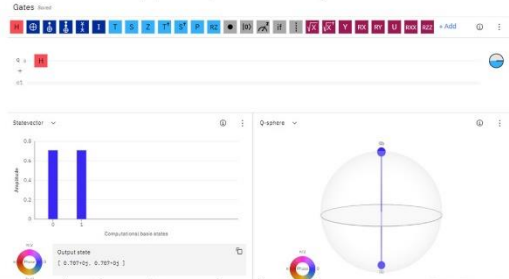
інвертує другий кубіт тільки для тих вхідних квантових станів, в яких перший (керуючий) кубіт дорівнює одиниці. Тобто, один кубіт призначається контрольним, а другий – цільовим. Якщо контрольний кубіт дорівнює 1, то цільовий інвертується. Якщо контрольний кубіт 0, то цільовий не змінюється. Контрольний кубіт ніколи не змінюється.

Вентиль контрольованого заперечення Controlled NOT



Додати операцію вимірювання Переглянути діаграму ймовірності

Вентиль Адамара. Створення схеми



Додати операцію вимірювання Переглянути діаграму ймовірності

Вентиль контрольованого заперечення Controlled NOT

Якщо перший кубіт контрольний, а другий цільовий, то результати виконання будуть таким:

$$CX|00\rangle = |00\rangle \quad CX|01\rangle = |01\rangle$$

$$CX|10\rangle = |11\rangle \quad CX|11\rangle = |10\rangle$$

$$CX|00\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |00\rangle$$

$$CX|10\rangle = CX \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |10\rangle$$

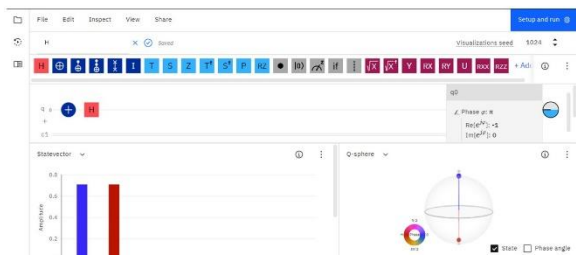
* Для допитливих: CX|01⟩ та CX|11⟩ виконати самостійно

Фізкультхвилинка

1. Швидко кліпати очима протягом 15 с.
2. Заплющити очі. Не відкриваючи очей, начебто подивитися ліворуч на рахунок «раз-чотири», повернутися у вихідне положення. Так само подивитися праворуч на рахунок «п'ять-вісім» і повернутися у вихідне положення. Повторити 5 разів.
3. Спокійно посидіти із заплющеними очима, розслабившись, упродовж 5 с.

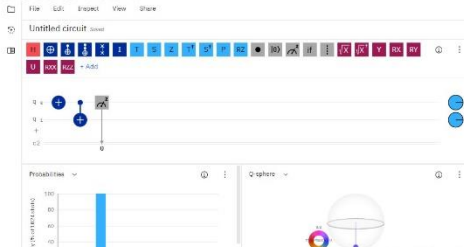


Вентиль Адамара. Створення схеми



Додати операцію вимірювання Переглянути діаграму ймовірності

Вентиль контрольованого заперечення Controlled NOT



Додати операцію вимірювання Переглянути діаграму ймовірності

Перевести квантову систему із початкового стану у кінцевий

Початковий стан	Кінцевий стан
0	1
1	-1
0	-1
0	-0
0	0+1



<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.paltangames.qlogic> або <https://quantum-computing.ibm.com/>

Перевести квантову систему із
початкового стану у кінцевий

Початковий стан	Кінцевий стан
00	10+11
00-01	00-01



<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.paltangames.qlogic> або <https://quantum-computing.ibm.com/>

Поділися враженнями



<https://padlet.com/legka/6q1jj448geyy9nme>