

DOI 10.34132/pard2024.26.08

Отримано: 22 липня 2024
Змінено: 11 листопада 2024
Прийнято: 4 грудня 2024
Опубліковано: 30 грудня 2024

Received: 22 July 2024
Revised: 11 November 2024
Accepted: 4 December 2024
Published: 30 December 2024

Oleksii Shkuratov
Liudmyla Antonova
Roman Dziuba

INNOVATIVE MECHANISMS FOR IMPLEMENTING STATE ECONOMIC POLICY FOR POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE: QUANTUM TRANSFORMATIONS AS A DRIVER OF DEVELOPMENT

The article emphasizes that quantum technologies are one of the key industries that can contribute to rapid economic growth and technological breakthrough. The quantum transformation of Ukraine's economy in the conditions of post-war recovery can become an important component of the state investment policy, which will stimulate innovative development and increase the country's competitiveness in the international arena. It is well-founded that its formation is one of the key trends in the development of the world's leading countries. Ukraine does not stand aside from global trends and strives for active integration into the world community, and therefore, for quantum transformation of the country. It is emphasized that quantum technologies have once already overturned the usual reality, giving us smartphones, ultra-flat TVs and, in general, all modern electronics. The second quantum revolution involves the introduction of quantum computers, quantum cryptography and quantum communication, capable of accelerating the development of new materials, optimizing logistics chains and increasing the level of data security. It is emphasized that the importance of these technologies is difficult to overestimate, as they become key elements in the struggle for technological superiority and have a significant impact

on key economic processes. It was emphasized that the development of quantum technologies and implementation of quantum transformation require large-scale investments. Countries such as the USA, China, Great Britain, EU countries, etc. have already invested billions in the creation of super-powerful quantum computers, the development of quantum cryptography algorithms, and the scaling of quantum communication. It was emphasized that Ukraine needs serious efforts to meet the challenges and opportunities of the Second Quantum Revolution, as ignoring the quantum transformation will have serious consequences for the country's economy. It is justified that, exhausted by the full-scale invasion of Russian aggressors, Ukraine currently does not have the necessary financial resources for the development and introduction of quantum technologies. It has been proven that it is possible to improve the situation only if a balanced state investment policy for quantum transformation of the country is developed and implemented. A road map of the sequence of actions for the formation of the state policy on quantum transformation investment is proposed, the management of which will create a favourable environment for attracting investments and thereby accelerating the quantum transformation of the Ukrainian economy.

Key words: Investment policy, investments, innovative transformations, economic policy, economic recovery, innovative development, quantum transformation, competitiveness.

«Технології врятовують люд-ство, але хто врятує самих людей? Що буде після цифровізації? Це фундаментальні філософські питання.

Ми стикаємося з двома екзистенційними викликами: як нам уникнути екологічного колапсу та як ми хочемо співіснувати з цифровим супер-інтелектом?

Ми повинні вирішити, чи підемо ми разом, щоб працювати над керівним баченням та новою нескінченною операційною системою для економіки»

Андерс Індсєт

«Technology will save humanity, but who will save people? What will happen after digitalization? These are fundamental philosophical questions.

We are dealing with two existential challenges: how do we avoid ecological collapse and how do we want to coexist with digital superintelligence?

We have to decide, whether we will come together to work on a guiding vision and a new infinite operating system for the economy»

Anders Indset

Постановка проблеми у загальному вигляді. В сучасних умовах суспільного розвитку ключовим питанням є пошук нових підходів, інструментів, методів, форм формування та реалізація державної інноваційної політики. На сьогодні гостро постала необхідність стабілізації економіки країни та наступне забезпечення високих і стабільних темпів економічного зростання переважно за рахунок інноваційних факторів. Реалії розвитку вітчизняної економіки свідчать про низьку інноваційну активність суб'єктів господарювання. При цьому економічний розвиток економіки України відбувається переважно на екстенсивній основі [18].

Нові вектори державної інвестиційної політики післявоєнного відновлення України повинні враховувати зміни в економічній та геополітичній ситуації, а також виклики та можливості, які виникли після війни. Відновлення економіки та інфраструктури має бути спрямоване на створення нових точок зростання, інтеграцію інновацій та залучення іноземних інвестицій. У цьому контексті особливе місце займають технологічні трансформації, розвиток стратегічних галузей і підвищення ефективності державного управління.

Однією з ключових галузей, що може сприяти швидкому економічному зростанню та технологічному прориву, є квантові технології. Переваги квантової трансформації для післявоєнного відновлення України:

- Економічне зростання: використання квантових технологій у промисловості, енергетиці та фінансовій сфері сприятиме модернізації економіки та підвищенню продуктивності.
- Підвищення безпеки: квантова криптографія може забезпечити надійніші системи захисту інформації, особливо у військовій та державній сферах.

– Науково-технологічний прорив: розвиток національної науки у галузі квантових технологій забезпечить зростання інтелектуального потенціалу країни.

– Інтеграція в глобальні процеси: співпраця з міжнародними партнерами допоможе Україні стати частиною глобальної квантової екосистеми.

Таким чином, державна політика з інвестування в квантову трансформацію в період післявоєнного відновлення може стати одним із ключових елементів стратегії національного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання квантових трансформацій в останні роки досить активно обговорюються серед науковців та політиків, оскільки квантові технології завдяки своєму потенціалу радикально трансформують традиційні економічні моделі та процеси [1]. Сучасна економіка перебуває на порозі нової ери публічного управління SMART-технологіями сталого розвитку регіону в системі забезпечення високого рівня соціальної безпеки держави, де квантові технології, квантові комп'ютери, квантова криптографія і квантові алгоритми відкривають перед економікою можливості, які можуть прискорити пошук оптимальних рішень, оптимізувати логістичні ланцюжки і підвищити рівень управління та безпеки даних [18].

Deutsch I., Lin J., Jiang Q., Zhang W., Lin Z. та Du X. зауважують, що квантові обчислення, з їхньою здатністю виконувати складні обчислення з безпрецедентною швидкістю, створюють сприятливе підґрунтя для розширення можливостей штучного інтелекту у вирішенні проблем, особливо в сценаріях, коли класичні обчислювальні підходи досягають своїх меж. Поєднання квантових обчислень і штучного інтелекту (ШІ) є новаторським перетином, який обіцяє неперевершену обчислювальну майстерність і передовий інтелект [2; 3; 4].

Втім, Awan U., Hannola L., Tandon A., Goyal R., Dhir A. стверджують, що квантова трансформація водночас представляє безліч викликів та вимагає стратегічного підходу до управління змінами та інновацій. Як і у випадку з будь-якою революційною технологією, шлях до впровадження квантових технологій всіяний перешкодами, що потребує на забезпечення цілісного та інклюзивного підходу до наступного етапу промислової еволюції [5].

Skip Sanzeri застережує, що попри всі позитиви квантової трансформації, квантові комп'ютери є надзвичайно потужними машинами, здатними зламати всі існуючі засоби шифрування, які наразі використовуються в усьому світі. Тож, якщо ворогуючі держави запустить потужний квантовий комп'ютер до того, як ми зможемо захистити дані та комунікації, нас чекає справжня катастрофа. Ось чому зараз життєво важливо сформувати виважену державну політику з інвестування квантових розробок, їх впровадження та прискорення квантової трансформації країни [6; 7].

Натомість, незважаючи на значний інтерес до квантових технологій, дослідження з формування державної політики інвестування квантової трансформації економіки залишаються обмеженими. Наявні роботи здебільшого фокусуються на дослідженні квантових технологій та розробці квантових алгоритмів, питанню ж створення сприятливого середовища для залучення інвестицій у квантові трансформації до тепер надається другорядне значення, що, як на наш погляд, є недопустимим, оскільки ігнорування вирішення даного питання матиме для економіки України суттєві негативні наслідки. Ця прогалина в наукових роботах свідчить про необхідність подальших досліджень з питань формування виваженої державної політики інвестування квантової трансформації.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Стаття покликана збагатити діалог між інвесторами та політиками з питань розвитку квантових технологій та їх впровадження, заклавши таким чином підґрунтя для формування державної політики з інвестування квантової трансформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасна економіка перебуває на порозі нової епохи, де квантові технології відіграють вирішальну роль. Ці технології являють собою новий клас інструментів, здатних радикально змінити традиційні підходи до обробки даних, безпеки та обчислювальної техніки. Квантові комп'ютери, квантова криптографія і квантовий зв'язок відкривають перед економікою можливості, які можуть прискорити визначення найефективніших і найвигідніших маршрутів для транспортування товарів і матеріалів, поліпшення машинного навчання, розробку легших і міцніших мате-

ріалів або акумуляторних батарей з більш тривалим терміном служби. Тож, важливість квантових технологій важко переоцінити, оскільки вони стають ключовими елементами в боротьбі за технологічну перевагу, мають значний вплив на ключові економічні процеси, включно з виробництвом, фінансовими послугами та управлінням ланцюгами поставок тощо. Такі зміни вимагають вжиття заходів щодо формування вираженої державної політики зі створення сприятливого середовища для інвестування її прискорення [1].

Становлення квантової економіки є одним із ключових трендів розвитку провідних країн світу. Економіка України не стоїть осторонь глобальних тенденцій, оскільки прагне до активної інтеграції у світове співтовариство [8].

Квантові технології являють собою нове покоління технологічних рішень, заснованих на принципах квантової механіки, таких як суперпозиція і заплутаність, які кардинально відрізняють їх від класичних комп'ютерних систем [9] та вносять значні зміни в економічні процеси через три основні механізми (рис.1) [1]:

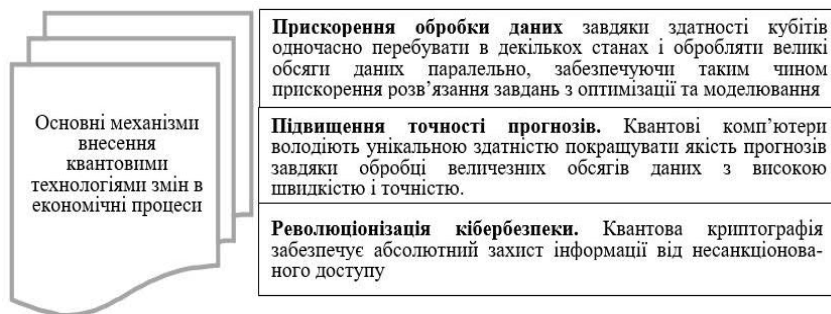


Рис. 1. Основні механізми внесення квантовими технологіями змін в економічні процеси.

Джерело: сформовано авторами на основі [1]

Виходячи з рис.1, квантова трансформація безумовно має багато переваг, які проявляються у вигляді численних мультиплікаційних ефектів. Натомість, окрім позитивних моментів, квантова трансформація несе в собі певні загрози, основною серед яких слід визнати кіберзлочинність (викрадення персональних даних, коштів

з рахунків, збір великої кількості конфіденційної та комерційної інформації, блокування діяльності тощо) [10].

Вже існує кілька квантових алгоритмів, які демонструють потенціал для досягнення значного прискорення порівняно з класичними алгоритмами. Тож, провідні експерти в цій галузі прогнозують, що квантова загроза матеріалізується в найближчі 10-12 років. Втім, зазначений термін є досить дискусійним, оскільки може бути ще коротшим – особливо з огляду на асиметрію інформації та секретність у світі щодо досягнень у сфері квантових обчислень, які використовують певні країни, що прагнуть отримати стратегічну перевагу.

Незалежно від цих часових рамок, уряду України необхідно сформулювати державну політику щодо упередження кіберзагроз і розуміти, що ми прискорено наближаємось до «небезпечної зони» (рис. 2) [11].



Рис. 2. Хронологія квантових загроз.

Джерело: сформовано авторами на основі [11]

Отже, створення сприятливого середовища для інвестування переходу на квантово-безпечну криптографію має бути розпочато вже зараз.

За оцінками Ради з питань квантових обчислень Всесвітнього економічного форуму, протягом наступних 10-20 років 20 мільярдів цифрових пристроїв потрібно буде модернізувати або замінити на постквантову криптографію [12]. Це оновлення не є простим вимкненням або виправленням, оскільки криптографія міцно вко-

ренилася на підприємствах, часто у фізично віддалених системах [11].

Коли квантові обчислення наберуть обертів, вони зламають деякі з існуючих криптографічних алгоритмів. Безпека ж нашого цифрового суспільства значною мірою залежить від цих криптографічних алгоритмів, які гарантують конфіденційність (приватність даних) і цілісність (точність даних) наших обмінів повідомленнями, банківських операцій в Інтернеті та даних, що зберігаються в хмарі. Безпека більшості цих алгоритмів ґрунтується на математичних проблемах, які вважаються нерозв'язними на класичних комп'ютерах, але стають розв'язними на квантових. Це загрожує безпеці криптографічних алгоритмів, які є фундаментальною частиною нашого цифрового життя [11].

Наразі існує два алгоритми – Шор і Гровер – які квантові комп'ютери можуть використовувати для розкриття складних математичних проблем, що лежать в основі деяких існуючих криптографічних алгоритмів. Алгоритм Шора може бути використаний для вирішення проблеми факторизації за лічені години або навіть хвилини, що зробить криптографічні алгоритми з відкритим ключем марними [1].

Алгоритм Гровера може бути використаний для прискорення пошуку секретного ключа, який використовується в симетричній криптографії для гарантування конфіденційності більшості наших обмінів і сховищ даних, а також для пошуку паролів, які використовуються для захисту облікових записів [13].

Тож, перелік квантових загроз не обмежується криптографічними алгоритмами, оскільки її каскадні ефекти можуть бути потенційно великими. До них відносяться алгоритми для розв'язання комбінаторних задач, моделювання фізичних систем, прискорення алгоритми машинного навчання тощо.

Як наслідок, заміна алгоритму може бути надзвичайно руйнівною і зайняти роки (як правило, вона вимагає модернізації або заміни компонентів криптографічної інфраструктури). Це одна з причин, чому уряд повинен вже зараз обмірковувати план квантової трансформації та інвестування заходів щодо її здійснення [11].

Уряду України слід інвестувати у створення національних квантових інститутів, розвиток спеціалізованих освітніх програм і підтримку стартапів у цій сфері [1]. Наприклад, у США Національна квантова ініціатива забезпечує фінансування досліджень і підтримку інноваційних компаній, таких як IBM, Google і Microsoft, а також численних стартапів, таких як IonQ, Rigetti, PsiQuantum, і дослідницьких університетів, які працюють у цій галузі. У грудні 2018 року уряд США прийняв Закон про національну квантову ініціативу, який дозволив виділити 1,2 мільярда доларів США (близько 4 доларів на людину в США) (плюс попередні 700 мільйонів доларів) протягом п'яти років на квантові дослідження [6].

Китай в свою чергу виділив 15,3 мільярда доларів державних коштів на інвестиції в квантові обчислення, що більш ніж удвічі більше, ніж уряди ЄС (7,2 мільярда доларів) і в багато разів більше, ніж Сполучені Штати, виділені (на федеральному рівні). За даними McKinsey & Company, Китай інвестує значні кошти в квантові дослідження, включаючи квантовий зв'язок, криптографію та обчислення [16; 17].

Канада має сильну квантову дослідницьку спільноту з Інститутом теоретичної фізики Perimeter та Інститутом квантових обчислень Університету Ватерлоо. Канадський уряд і приватний сектор, включаючи такі компанії, як D-Wave Systems і Xanadu, зробили значні інвестиції в квантові технології.

У Європі запущено проєкт Quantum Flagship, спрямований на створення стійкої квантової індустрії [1]. На його реалізацію ЄС у 2018 році, передбачив надання 1 млрд. євро протягом десяти років.

В свою чергу Великобританія запустила Національну програму квантових технологій із запланованими витратами понад 1 мільярд фунтів стерлінгів протягом десяти років [6].

Тож, аналізуючи світовий досвід з інвестування квантової трансформації країн, приходимо до висновку, що наразі існують дві принципово різні моделі участі держави в квантовій трансформації: ринкова (саморегулювання) та адміністративно - управлінська. У першій моделі роль держави зводиться до створення належних умов для квантового переходу, (зокрема, США та країни

ЕС). Друга модель базується на поступовому розвитку інфраструктури квантової економіки під керівництвом державних інституцій влади з подальшим впровадженням у цифровий сектор відповідних суб'єктів господарювання (зокрема, Китай). Стратегії більшості країн щодо квантової трансформації є симбіозом двох названих моделей регулювання.

Отже, фундаментальним підґрунтям формування державної політики інвестування квантової трансформації має стати вибір моделі участі держави в переході до квантово-безпечної економіки та розробка Дорожньої карти послідовності дій формування державної політики з інвестування квантової трансформації (рис.3).

Дотримання послідовності дій, передбачених запропонованою Дорожньою картою сприятиме створенню вкрай необхідного сприятливого середовища для залучення інвестицій, необхідних для прискорення квантової трансформації економіки України.

Підсумовуючи вищенаведене, слід зазначити, що державна інвестиційна політика повоєнного відновлення України має бути акцентована на квантових трансформаціях. Саме це може стати стратегічним напрямком для швидкого розвитку та модернізації економіки країни, адже квантові технології мають величезний потенціал у сферах безпеки, обробки даних, енергетики, медицини та інших галузях. Для того, щоб реалізувати цей потенціал, необхідно забезпечити ефективну державну політику, спрямовану на підтримку інновацій, наукових досліджень та промислового впровадження квантових технологій, а саме:

- 1) Держава повинна розробити чіткий стратегічний план щодо розвитку квантових технологій, включаючи інвестиції в наукові дослідження, освіту та інфраструктуру.

- 2) Необхідно визначити пріоритетні напрями досліджень (квантові комп'ютери, квантова криптографія, квантові матеріали тощо) та забезпечити їх фінансування.

- 3) Забезпечити підтримку наукових досліджень та інновацій : (фінансування дослідницьких інститутів, університетів та стартапів, які займаються розробками в галузі квантових технологій);

4) Створення національних програм грантів та підтримка міжнародних наукових колаборацій з лідерами у цій сфері, такими як США, ЄС, Китай.

5) Забезпечити фінансування інфраструктурних інвестицій: розвиток лабораторій, центрів обробки даних та інших інфраструктурних об'єктів, необхідних для квантових досліджень і промислового впровадження технологій.

6) Ініціювати створення інноваційних хабів для стимулювання кооперації між державним сектором, науковими установами та приватними інвесторами.

7) Запровадити освітні програми для підготовки спеціалістів у галузі квантових технологій.

8) Забезпечити підтримку наукової мобільності та співпраці українських учених із провідними світовими університетами та дослідницькими центрами.

9) Стимулювати механізми реалізації приватно-державного партнерства: залучення приватних інвестицій через створення сприятливих умов для венчурних фондів, стартапів та корпорацій, що зацікавлені в розвитку квантових технологій.

10) Запроваджувати податкові пільги та інші стимули для компаній, що вкладають у дослідження і розробки в цій галузі.

11) Законодавче забезпечення та регулювання квантових технологій та захисту інтелектуальної власності;

12) Забезпечення кібербезпеки в умовах нових загроз, пов'язаних із розвитком квантових технологій, зокрема квантової криптографії.

13) Стимулювання міжнародної співпраці: інтеграція у міжнародні квантові ініціативи та участь у глобальних програмах, таких як Quantum Flagship (ЄС) чи National Quantum Initiative (США); спільні дослідницькі програми з іншими країнами для обміну знаннями та технологіями.

Вивчення потенційних змін ландшафту загроз	Ідентифікація потенційних загроз та їх картування. Встановлення впливу квантових загроз на зміну ландшафту загроз підприємств
Оцінка готовності до впровадження технологій квантової безпеки	Інвентаризація мережевої інфраструктури, криптосистем, програмного та технічного забезпечення. Визначення критичних факторів успіху та пріоритетних рішень щодо розвитку й впровадження технологій квантової безпеки.
Створення сприятливого середовища з регулювання розвитку технологій квантової безпеки держави та бізнесу	Імплементация та поетапне впровадження міжнародних пост-квантових криптографічних стандартів NIST чи Робочої групи з розробки інтернет-технологій (IETF). Включення до складу видатків Державного бюджету та видатків енергокомпаній витрат на розвиток квантових технологій. Залучення інвестицій на впровадження технологій забезпечення квантової безпеки держави та бізнесу
Розгляд комбінацій впровадження технологій квантової безпеки	Розгляд комбінацій квантового генератора випадкових чисел QRNG, пост-квантових криптосистем PQC, протоколів і розподілу квантових ключів QKD для моніторингу трафіку, перевірки квантової стійкості передачі даних, гнучкості і маневреності з метою швидкої адаптації до нових рішень.
Поетапне впровадження технологій квантової безпеки держави та бізнесу	Розробка та впровадження квантово-безпечних алгоритмів, захищених від атак за допомогою квантових комп'ютерів. Накладання квантових алгоритмів на застарілу мережеву інфраструктуру. Стрес-тестування пост-квантових криптосистем, протоколів і програмного забезпечення. Підтримка очікуваної продуктивності мережі та зв'язку з модернізованим обладнанням.
Створення Агентства з кібербезпеки та безпеки інфраструктури	Створення Агентства з кібербезпеки та безпеки інфраструктури з покладанням на нього зобов'язань щодо створення та контролю за квантово стійкою кібербезпекою, оскільки для оновлення існуючих федеральних і комерційних технологій і криптографії потрібні значні зусилля та роки
Формування сприятливого середовища інвестування квантової трансформації	Створення нормативно-правового поля Формування звітності щодо квантових загроз і своєчасне вжиття заходів щодо їх упередження ризиків та втрат. криптографічну «інвентаризацію», яка включає активи даних, щоб визначити, які з них необхідно повторно зашифрувати за допомогою квантово-стійких криптографічних

Рис. 3. Дорожня карта послідовності дій формування державної політики з інвестування квантової трансформації.

Джерело: сформовано авторами

Висновки. За результатами дослідження констатовано, що сучасна економіка перебуває на порозі нової епохи – квантової, становлення якої наразі є одним із ключових трендів розвитку провідних країн світу.

Україна ж, як країна, що не стоїть осторонь глобальних трендів та прагне до активної інтеграції у світове співтовариство, також передбачає здійснення квантової трансформації економіки країни. Підкреслено, що квантові технології одного разу вже перевернули звичну реальність, подарувавши нам смартфони, надплоскі телевізори і взагалі всю сучасну електроніку. Друга ж квантова революція передбачає запровадження квантових комп'ютерів, квантової криптографії та квантового зв'язку, здатних прискорити розробку нових матеріалів, оптимізувати логістичні ланцюжки і підвищити рівень безпеки даних.

Підкреслено, що важливість цих технологій важко переоцінити, оскільки вони стають ключовими елементами в боротьбі за технологічну перевагу та мають значний вплив на ключові економічні процеси. Втім, розробка квантових технологій та здійснення квантової трансформації потребують на масштабні інвестиції. Такі країни, як США, Китай, Великобританія, країни ЄС та ін., вже наразі інвестували мільярдні інвестицій у створення надпотужних квантових комп'ютерів, розробку алгоритмів квантової криптографії та масштабування квантового зв'язку.

Україні ж потрібно докласти серйозних зусиль щоб відповісти викликам і можливостям Другої квантової революції. Виснажена повномасштабним вторгненням російських агресорів, Україна наразі немає необхідних фінансових ресурсів для розвитку та запровадження квантових технологій. Поліпшити ситуацію можливо лише за умови розробки та впровадження виваженої державної політики інвестування квантової трансформації країни.

Запропоновано Дорожню карту послідовності дій формування державної політики з інвестування квантової трансформації, керування якою дозволить створити сприятливе середовище для залучення інвестицій та прискорити таким чином квантову трансформацію економіки України.

Таким чином, квантові технології можуть стати одним із найважливіших напрямків економічного відновлення та розвитку України. Вони мають потенціал для впровадження в різних секторах, включаючи оборону, енергетику, фінанси, охорону здоров'я та те-

лекомунікації, забезпечуючи модернізацію інфраструктури і підвищення національної конкурентоспроможності. Цей напрямок може стати потужним інструментом для технологічної модернізації країни, підвищення її економічної стійкості та безпеки. Реалізація таких ініціатив вимагатиме активної участі держави, належного фінансування, розвитку освітніх програм та міжнародної кооперації.

ІННОВАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ПОЛІТИКИ ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ: КВАНТОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯК ДРАЙВЕР РОЗВИТКУ

У статті наголошено, що однією з ключових галузей, що може сприяти швидкому економічному зростанню та технологічному прориву, є квантові технології. Квантова трансформація економіки України в умовах післявоєнного відновлення може стати важливою складовою державної інвестиційної політики, яка стимулюватиме інноваційний розвиток і підвищуватиме конкурентоспроможність країни на міжнародній арені.

Обґрунтовано, що її становлення є одним із ключових трендів розвитку провідних країн світу. Україна не стоїть осторонь глобальних трендів та прагне до активної інтеграції у світове співтовариство, а отже, і до квантової трансформації країни. Наголошено, що квантові технології одного разу вже перевернули звичну реальність, подарувавши нам смартфони, надплоскі телевізори і взагалі всю сучасну електроніку. Друга ж квантова революція передбачає запровадження квантових комп'ютерів, квантової криптографії та квантового зв'язку, здатних прискорити розробку нових матеріалів, оптимізувати логістичні ланцюжки і підвищити рівень безпеки даних.

Підкреслено, що важливість цих технологій важко переоцінити, оскільки вони стають ключовими елементами в боротьбі за технологічну перевагу та мають значний вплив на ключові економічні процеси. Акцентовано, що розробка квантових технологій та

здійснення квантової трансформації потребують на масштабні інвестиції. Такі країни, як США, Китай, Великобританія, країни ЄС та ін., вже наразі інвестували мільярди інвестицій у створення надпотужних квантових комп'ютерів, розробку алгоритмів квантової криптографії та масштабування квантового зв'язку. Наголошено, що Україна потребує серйозних зусиль щоб відповісти викликам і можливостям Другої квантової революції, оскільки ігнорування квантової трансформації матиме досить серйозні наслідки для економіки країни. Обґрунтовано, що виснажена повномасштабним вторгненням російських агресорів, Україна на разі немає необхідних фінансових ресурсів для розвитку та запровадження квантових технологій. Доведено, що поліпшити ситуацію можливо лише за умови розробки та впровадження виваженої державної політики інвестування квантової трансформації країни. Запропоновано Дорожню карту послідовності дій формування державної політики з інвестування квантової трансформації, керування якою дозволить створити сприятливе середовище для залучення інвестицій та прискорення таким чином квантової трансформації економіки України.

Ключові слова: інвестиційна політика, інвестиції, інноваційні трансформації, економічна політика, економічне відновлення, інноваційний розвиток, квантова трансформація, конкурентоспроможність.

Author Contributions: Conceptualization, B.W.A. and L.W.F.; Writing – original draft, B.W.A. and L.W.F.; Writing – review & editing, B.W.A. and L.M.F. Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable as study did not include human subjects.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Korzh, R. (2024). Vplyv kvantovykh tekhnolohii na innovatsiini protsesy v hlobalnii ekonomitsi [The Impact of Quantum Technologies on Innovation Processes in the Global Economy]. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniki – Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, (Vol. 9), 2, (pp. 83-89). Retrieved from: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-14> [in Ukrainian].
2. Deutsch, I.H. (2020). Harnessing the Power of the Second Quantum Revolution. *PRX Quantum*, (Vol.1), 020101 [in English].
3. Lin, J., Jiang, Q., Zhang, W., Lin, Z., & Du, X. (2024). Quantum-Enhanced Zero Trust Security: Evolution, Implementation, and Application. *Proceedings from QCNC' 24: International Conference on Quantum Communications, Networking, and Computing (QCNC)*. (pp. 211-215). Japan: Kanazawa. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/QCNC62729.2024.00040> [in English].
4. How, M.-L., & Cheah, S.-M. (2024). Forging the Future: Strategic Approaches to Quantum AI Integration for Industry Transformation. *AI MDPI*, (Vol. 5), (pp. 290-323). Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/ai5010015> [in English].
5. Awan, U., Hannola, L., Tandon, A., Goyal, R.K., & Dhir, A. (2022). Quantum Computing Challenges in the Software Industry. *A Fuzzy AHP-Based Approach. Inf. Softw. Technol.* (Vol. 147), 106896 [in English].
6. Sanzeri, S. (2024). The Quantum Computing Threat. *Counterterrorism and Cybersecurity*, (pp. 547-567). Springer, Cham. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63126-9_17 [in English].
7. Goswami, R. (2023). «Aggressive» China cyberattacks are the «defining threat» of our time, top U.S. cyber official says. [www.cnn.com](https://www.cnn.com/2023/06/13/china-cyberattacks-are-a-defining-threat-top-us-cyber-official.html). Retrieved from: <https://www.cnn.com/2023/06/13/china-cyberattacks-are-a-defining-threat-top-us-cyber-official.html>. [in English].
8. Kotelevets, D.O. (2022). Tendentsii rozvytku tsyfrovoy ekonomiky v Ukraini [Trends in the development of the digital economy in Ukraine]. *Problemy suchasnykh transformatsii. Seriya: ekonomika ta upravlinnia – Problems of modern transformations. Series: economics and management*, 5. Retrieved from: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2022-5-03-01> [in Ukrainian].
9. Indset, A. (2021). *Kvantova ekonomika [Quantum economics]*. Kyiv: ArtHuss [in Ukrainian].
10. Reshetov, S.O., & Polusmiak Yu.I. (2020). Vplyv tsyfrovoy transformatsii ekonomiky na ekonomichnu bezpeku [The impact of digital transformation of

the economy on economic security]. *Management and entrepreneurship: trends of development – Management and entrepreneurship: trends of development*, 4 (22), (pp. 8-16). Retrieved from: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2022-4/22-01> [in Ukrainian].

11. Jurgens, J., Kohn, I., Souta, C. (2022). *Transitioning to a Quantum-Secure Economy*. Retrieved from: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Transitioning%20to_a_Quantum_Secure_Economy_2022.pdf [in English].

12. Global Future Council on Quantum Computing: Frequently Asked Questions. (2020). (n.d.). [www3.weforum.org](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Future_Council_on_Quantum_Computing.pdf). Retrieved from: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Future_Council_on_Quantum_Computing.pdf [in English].

13. Gidney, C., & Ekerå, M. (2021). How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits. *quantum-journal.org*. Retrieved from: <https://quantum-journal.org/papers/q-2021-04-15-433/> [in English].

14. Webber, M. (Eds.). (2022). The impact of hardware specifications on reaching quantum advantage in the fault tolerant regime. *avs.scitation.org*. Retrieved from: <https://avs.scitation.org/doi/10.1116/5.0073075> [in English].

15. Post-Quantum Cryptography. (2022). (n.d.). [csrc.nist.gov](https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization/evaluation-criteria/security-(evaluation-criteria)). Retrieved from: [https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization/evaluation-criteria/security-\(evaluation-criteria\)](https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization/evaluation-criteria/security-(evaluation-criteria)) [in English].

16. McKinsey & Company. Betting big on quantum. (2022). (n.d.). [www.mckinsey.com](https://www.mckinsey.com/featured-insights/sustainable-inclusive-growth/chart-of-the-day/betting-big-on-quantum). Retrieved from: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/sustainable-inclusive-growth/chart-of-the-day/betting-big-on-quantum> [in English].

17. López A., Da Silva, M., & Madeira, M. (2024). *Quantum Technologies: Digital Transformation, Social Impact, and Cross-sector Disruption*. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.18235/0001613> [in English].

18. Zhovnirchuk, Y., Prykhodko, I., Romin, A., Bandura, I., & Vavreniuk, S. (2023). Public Management of SMART Specialization of Sustainable Development of the Region in the System of Ensuring innovation Security. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, (Vol. 18), 2, (pp. 385-391). Retrieved from: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180206> [in English].

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олексій Шкуратов, д.е.н., професор, проректор з навчальної роботи та стратегічного розвитку Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна. E-mail: shkuratov.oi@knuba.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8656-723X>.

Oleksiy Shkuratov, Doctor of Economics, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs and Strategic Development of the Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine. E-mail: shkuratov.oi@knuba.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8656-723X>.

Людмила Антонова, д.держ.упр., професор кафедри обліку і аудиту Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: antonovav77@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2975-6453>.

Liudmila Antonova, Doctor of Science of Public Administration, Professor of the Department of Accounting and Audit of the Black Sea National University named after Peter Mohyla, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: antonovav77@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2975-6453>.

Роман Дзюба, аспірант кафедри публічного управління та адміністрування Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна. E-mail: dziuba0610@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5767-0423>.

Roman Dzyuba, PhD-student, Department of Public Management and Administration, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine. E-mail: dziuba0610@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5767-0423>.

Shkuratov, O., Antonova, L., & Dzyuba, R. (2024). Innovative mechanisms for implementing state economic policy for post-war reconstruction of Ukraine: quantum transformations as a driver of development. *Public Administration and Regional Development*, 26, 1254-1272. <https://doi.org/10.34132/pard2024.26.08>