
КОМП'ЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 658: 512.011: 681.326: 519.713

QUANTUM-DRIVEN АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ

ЛЮБАРСЬКИЙ М.М., ХАХАНОВ В.І.,
ХАХАНОВ І.В., ЧУМАЧЕНКО С.В.

Пропонується аналіз існуючих публікацій в області створення моделей, методів, алгоритмів і архітектур квантового комп'ютинга для тестування і моделювання цифрових систем з метою створення теорії і практики квантового проектування цифрових систем. Ставляться науково-практичні завдання дослідження в рамках технологій синтезу тестів і моделювання несправностей для спеціалізованих логічних схем, включаючи X-функції.

1. Кіберкультура квантового комп'ютингу

Кіберкультура квантового memory-driven комп'ютинга інтегрує технології паралельного рішення часовитратних комбінаторних задач. Масштабна карта досліджень, відповідних квантовій кіберкультурі, націлена на створення паралельних алгоритмів для SoC Design and Test. Дається аналітичний огляд кіберфізичних технологій, задекларованих в Gartner's Hype Cycle [1], а також деякі роз'яснення, пов'язані з їх застосуванням в науці, освіті, транспорті, промисловості та державних структурах. Показуються окремі напрямки, які не ввійшли в цикл ринково привабливих технологій, що стосуються кіберсоціального моніторингу та цифрового управління суспільством [2, 3]. Пропонується розширити значення технологій, пов'язаних з розумним цифровим світом, зеленими містами і 5G-телекомунікаціями [4]. Даються рекомендації до використання топ 10 компонентів Gartner супер-циклу в бізнесі і науково-освітніх процесах університетів. Формулюється D-метрика вимірювання відстаней між процесами і явищами в кіберфізичному і соціальному просторі у вигляді універсальної формули для точного визначення дуги зворотного транзитивного замикання в трикутнику по двох відомих відстанях, що доповнює дугу до конволюційного циклу. Видається memory-driven

інноваційна архітектура квантового комп'ютинга, яка характеризується використанням елетромагнітних фотонних транзакцій запису-зчитування на структурі електронів при відсутності логіки, пов'язаної з суперпозицією і змішування станів. Пропонуються паралельні методи мінімізації булевих функцій, діагностування несправностей цифрових схем і рішення задачі покриття на основі кубітних структур даних. Вводиться клас логічних X-функцій, технологічних для тестування і діагностування, визначаються кубітні моделі і методи для моделювання несправностей цифрових пристроїв і компонентів. Описується архітектура хмарних сервісів проектування, тестування і верифікації цифрових пристроїв на основі кубітних моделей логічних примітивів.

2. Quantum memory-driven computing for design and test

Пропонується технологічна культура quantum memory-driven computing, яка інтегрально має переваги структурної однорідності і паралелізму обробки великих даних за рахунок усунення транзакцій між пам'яттю і ALU-процесором, і виключення квантових операцій суперпозиції і змішування. Пропонується memory-driven інноваційна архітектура квантового комп'ютинга, яка характеризується використанням елетромагнітних фотонних транзакцій запису-зчитування на структурі електронів при відсутності логіки, пов'язаної з суперпозицією і змішування станів. Пропонуються паралельні методи мінімізації булевих функцій, діагностування несправностей цифрових схем і розв'язання задачі покриття на основі унітарного кодування кубітних структур даних. Вводиться кубітна форма логічних X-функцій, технологічних для тестування і діагностування цифрових систем. Визначаються кубітні моделі і методи для моделювання несправностей цифрових пристроїв і компонентів. Описується архітектура хмарних сервісів проектування і моделювання цифрових пристроїв на основі кубітних моделей логічних і функціональних елементів. Gartner тенденції світової кіберкультури формують технологічну основу для створення глобального кіберфізичного комп'ютинга в межах технологічного укладу Internet of Things (рис. 1).

Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018

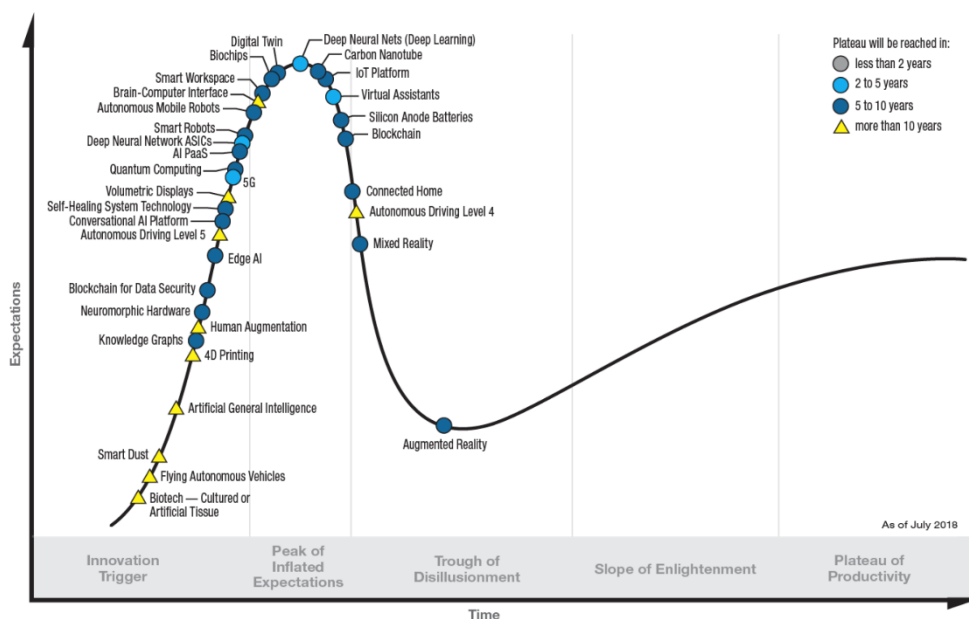


Рис. 1. Цикл компанії Gartner для дзірапторних технологій 2018

При цьому квантовий комп'ютинг розглядається як енергозберігаюче майбутнє цифрового світу, створюваного для підвищення якості життя і збереження екології планети [1, 5, 6]. Зокрема, квантовий паралельний комп'ютинг і кубітні структури даних дозволяють спростити алгоритми в області SoC Design and Test і підвищити швидкодію програмних продуктів на класичних комп'ютерах.

Стратегічні тенденції в області цифрових технологій привели у 2018 році до суттєвих дзірапцій, що надасть нові можливості розробникам корпоративної архітектури і конструктивних інновацій з метою створення конкурентних переваг при використанні нових трендів кіберкультури (рис. 2):

- 1) Автономні фізичні та віртуальні інтелектуальні і координовані речі.
- 2) Розширена (доповнена кіберпростором) соціальна аналітика прав і можливостей громадянина для вироблення актуаторних впливів.
- 3) AI-кероване проектування, розширений (доповнений – augmented) і автоматичний розробник.
- 4) Цифрові близнюки; цифровий образ організації або компанії.
- 5) Спроможні, взаємодоповнюючі один одного Edge Computing and Cloud Computing. Роль 5G в комунікаціях між кінцевими пристроями.

6) Досвід занурення в цифрову дійсність. Сприйняття змін в цифровому світі. Virtual and Augmented Reality підвищують продуктивність праці. Майбутнє залежить від досвіду сьогодення.

7) Використання Blockchain в соціальній сфері [7, 8].

8) Smart Spaces. Розумні міські простори, що створюють шляхи. Інтелектуальний простір створює карти, а не напрям [9].

9) Цифрова етика і конфіденційність особистого життя.

10) Квантові обчислення; квантова безпека; розвиток і становлення квантового комп'ютинга. Застереження – слід поважати QC, працювати з обережністю.

Порівняння двох трендів (2017 [6] і 2018 [1]) від компанії Гартнер дає можливість визначити нові технології, а також ті, які не витримали випробування часом і зійшли з дистанції в результаті гонки. Істотною уявляється перманентність тренда розвитку квантових технологій протягом останніх 5 років. З нею пов'язуються оптимістичні прогнози у розв'язанні проблем комбінаторної оптимізації при вирішенні задач кіберзахисту і обробки великих даних.

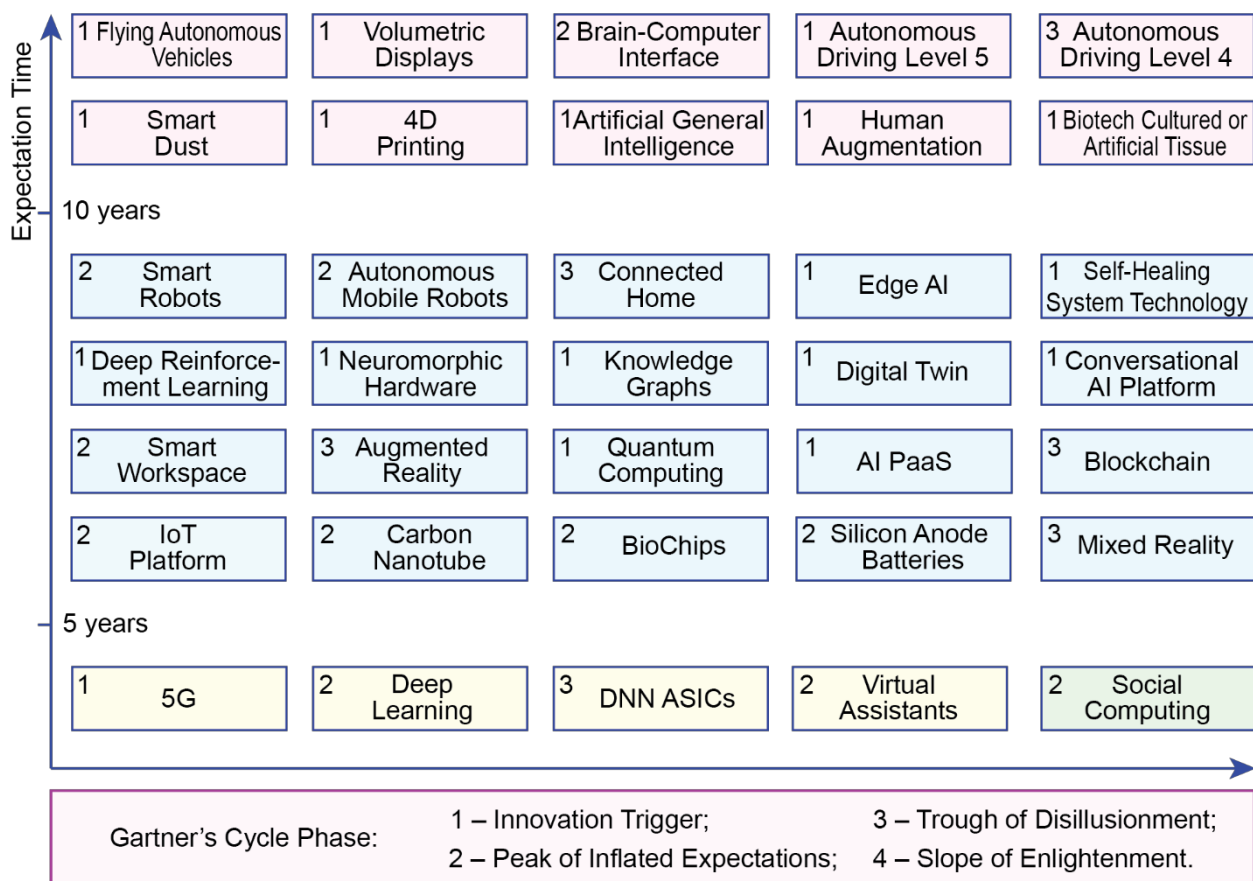


Рис. 2. 2018 Gartner's Table for Emerging Technologies

Сутність дослідження полягає в інноваційній емуляції Quantum Computing і Memory Computing на Classical Computing для синтезу та аналізу цифрових систем на кристалах. Мотивація і ринкова привабливість дослідження включає такі пункти: 1) Згідно з журналом «Форбс», близько 20 мільярдів доларів інвестується в квантовий комп'ютинг, з яких половина витрачається на створення паралельних квантових алгоритмів, їх емуляцію і верифікацію на класичних комп'ютерах. 2) Перенесення існуючих додатків на квантовий комп'ютер, на думку експертів, не збільшить продуктивності існуючих послідовних алгоритмів, напрацьованих людством. Потрібно створювати паралельні методи. 3) Практично всі програми на планеті працюють в режимі створення послідовних обчислювальних процесів. Тому університети сьогодні повинні переучувати фахівців методам квантового паралельного програмування на основі кубітних структур даних. 4) В даний час актуальною видається розробка паралельних програмних алгоритмів, орієнтованих на ринково доступні квантові комп'ютери, які використовують кубітні структури даних. 5) Продуктивність квантових memory-driven методів проектування і тестування цифрових систем на кристалах, імплементованих в класичні комп'ютери, являє собою інновацію, яка підвищує швидкість обчислень на основі використання додаткової

пам'яті. 6) Реалізація memory-driven Quantum Computing дозволить істотно спростити парадигму комп'ютинга шляхом відмови від ALU, машини фон Неймана, в сторону паралельної обробки великих даних на обчислювальній пам'яті.

Мета дослідження – розробка квантового memory-driven computing для паралельного синтезу та аналізу цифрових систем на кристалах, що використовують кубітні структури даних, на класичних комп'ютерах.

Завдання дослідження: 1) Огляд існуючих квантових архітектур і практичних реалізацій комп'ютинга. 2) Метричне порівняння квантового та класичного комп'ютинга. 3) Розробка квантових memory-driven архітектур для емуляції паралельних алгоритмів на класичних комп'ютерах. 4) Створення паралельних кубітних методів аналізу цифрових систем на кристалах. 5) Реалізація методів, алгоритмів тестування і моделювання цифрових пристроїв.

3. State of the art. Квантовий комп'ютинг

Інноваційна пропозиція полягає у створенні квантового memory-driven комп'ютинга [10-12] без квантових операцій суперпозиції і змішування (АБО, НІ) на основі використання характеристичного рівняння $M = Q [M(X)]$, яке задає дві транзакції запису-зчитування на атомарній структурі електронів, що формує обчислювальну пам'ять M ,

Q, X. Виключити дві технологічно складні операції з квантового комп'ютинга – означає істотно спростити архітектуру і привести її до структури пам'яті на електронах для виконання транзакцій між ними за допомогою квантів або фотонів. Підтвердженням спроможності запропонованої інноваційної квантової архітектури можуть служити публікації, які підкреслюють стійку тенденцію до створення квантового комп'ютинга на атомарній структурі пам'яті з передачею інформації за допомогою фотонів або квантів.

Вчені з Каліфорнійського технологічного інституту створили оптичну квантову пам'ять [13], в яких інформація передається шляхом кодування даних з використанням квантового стану фотонів. Розмірність квантової пам'яті в 1000 разів менша, ніж традиційні класичні рішення. Вона реалізована в нанопорожнині, яка дозволяє зберігати інформацію в дуже невеликому обсязі.

Практична реалізація ідеї заміни електронів фотонами призводить до створення комп'ютинга з швидкодією, близькою до швидкості світла [14]. Корейські дослідники зробили ще один крок до оптичних обчислень. Вони створили *photon-triggered* нанодротяний транзистор на основі кристалічного і пористого кремнію, де перемикання і посилення величини токового сигналу здійснюється під впливом фотона. Використання фотонів в логічних вентилях AND, OR і NAND приведе до ультракомпактних нанопроцесорів і нанорозмірних фотоприймачів для отримання зображень з високою роздільною здатністю.

Вчені з Колумбійського університету провели успішні досліди зі створення транзистора з одного атома в молекулярній електроніці [15]. Вони реалізували геометрично упорядкований кластер неорганічних атомів з центральним ядром, що складається з 14 атомів, яке пов'язало з золотими електродами, що дозволило керувати транзистором під впливом одного електрона при кімнатній температурі.

Вперше досягнута передача цифрових сигналів між молекулами, що є істотним досягненням на шляху розвитку молекулярного комп'ютинга [16]. Створення електронних компонентів з окремих молекул є багатообіцяючою стратегією для мініатюризації та інтеграції електронних пристроїв. Проте практична реалізація молекулярних пристроїв і схем для передачі і обробки сигналів при кімнатній температурі виявилася складним завданням, яке вирішене шляхом розміщення молекул SnCl₂Pc на поверхні міді (Cu). Площинна орієнтація молекул в міжмолекулярній взаємодії служить носієм інформації. В пов'язаних молекулярних масивах сигнал передається від однієї молекули до іншої за наперед заданими маршру-

тами, які реалізують логічні операції. Явища площинної орієнтації дозволяють використовувати молекули, які мають внутрішні бістабільні стани, для створення складних молекулярних пристроїв і схем.

Вчені з Інституту Нільса Бора (NBI, Копенгаген) винайшли нове джерело світла, здатне випромінювати поодинокі фотони з безпрецедентною точністю вимірювання 98,4%. Використання ефективних однофотонних джерел орієнтоване на квантові мережі, криптографію та симулятори, які представляють собою дзірапторні вирішення соціальних проблем в галузі забезпечення безпеки та створення суперкомп'ютерів. Однофотонні джерела в даний час поки не є комерційно доступними, проте квантові дослідження забезпечуються великими інвестиціями в практично всіх провідних компаніях планети. Наприклад, лабораторія Sparrow Quantum Technologies [17] (SQT), орієнтована на розробку і комерціалізацію фотонних квантових технологій, отримала 2 млн євро для виробництва і продажу нового SQT-чіпа. Він складається з квантового джерела світла, вбудованого в фотонний чіп, виготовлений за напівпровідниковою нанотехнологією. Наступний крок в бізнес-плані SQT - інноваційний проєкт: розробка набору ключових фотонних компонентів, які мають комерційну застосовність: Quantum Photonic Toolbox (QTOOL) як настроюваний інструментарій для досліджень в області фотонних квантових обчислень, криптографії, мереж.

Компанія IonQ завершила проєкт [18] з розробки квантових обчислень для комерційних додатків, вартістю 20 мільйонів доларів, за участю нових стратегічних інвесторів, включаючи: New Enterprise Associates (NEA) і GV (раніше Google Ventures). Зусилля з використання квантової механіки для прискорення обчислень в останні роки отримали величезний імпульс, викликаний значним науковим прогресом, зростаючими ринковими інтересами та істотними інвестиціями з боку урядів, організацій і технологічних компаній. Необхідні інноваційні розробки конкретних програм для практичних квантових комп'ютерів. «Місія IonQ полягає в перетворенні квантових обчислень в надійний масштабований комп'ютинг» (David Moehring, CEO IonQ). Захоплення іонів є ключовою відмінністю підходу IonQ від інших досліджень в області квантових обчислень і створення платформи для реалізації комерційних додатків. Технологія захоплення іонів, що використовує лазери для охолодження і виділення окремих іонів, є ринково перспективною, оскільки спіймані іони ідентичні, стабільні, контрольовані, масштабовані і передбачувані.

Інтерес представляють «дивні» квантові частинки [19], що моделюються в краплі ультрахолодного газу, так звані скіріміони (skyrmion), вперше запропоновані у 1962 році фізиком і математиком США Тоні Скірме. Завдяки точному контролю за допомогою електромагнітних котушок, що оточують скляну вакуумну камеру, заповнену надтекучим рубідієм, команда вчених з США і Фінляндії вперше створила 3D скіріміони в полі спинів, що локалізовані у збудженому просторі, які важко розірвати. Вони сконцентровані у вигляді крапельки, що містить 200 000 переохолоджених атомів рубідію на рівні абсолютного нуля. Відкриття, опубліковане у Science Advances, дає уявлення про кульову блискавку, яка може проникати крізь стіни і раптово вибухати, подібно динаміту. Проте кульові блискавки, як і скіріміони, можуть утримуватися разом електромагнітним полем, і набувають дивовижну структурну незруйновність. Даний факт можна використовувати для організації квантового комп'ютинга, завдяки стабільності і передбачуваності атомної структури квантових частинок (протонів і нейтронів) в умовах електромагнітного утримання понадохолодженого газу рубідію.

Публікація [20] спрямована на створення і використання сильного спин-фотонного зв'язку в кремнієвому кристалі для розробки квантових схем на основі затворів квантових точок напівпровідника. Потенційно, магнітний диполь або спин одного електрона для використання як кубіта має переваги в його часовій стійкості у порівнянні з зарядово-фотонним зчепленням (charge-photon coupling). Автори створили нано-гібрид шляхом об'єднання спіна електрона із зарядом електрона у вигляді подвійної кремнієвої квантової точки. Такий підхід привів до створення сильного зв'язку між поодиноким електронним спіном і одним мікрохвильовим фотоном, що забезпечує шлях до масштабованих квантових схем зі спин-кубітами. Тривалий час когерентності (узгодженості) одиночних спинів в кремнієвих квантових точках роблять ці системи привабливими для квантових обчислень. Однак питання про масштабування спин-кубітних систем залишається відкритим. Для можливого вирішення даної проблеми автори продемонстрували сильний зв'язок між одним електронним спіном і одним мікрохвильовим фотоном. Електронний спин вловлюється подвійною квантовою точкою кремнію, а мікрохвильовий фотон зберігається у високоомному (high-impedance) надпроводовому резонаторі на кристалі. Компонент електричного поля фотонного резонатора безпосередньо пов'язаний з зарядом диполя електрона в подвійній точці і опосередковано пов'язаний з спіном електрона через сильний локальний

градієнт магнітного поля від сусіднього мікромагнетіка. Отримані результати забезпечують шлях до реалізації великих мереж квантових точково-спінових (dot-based spin) кубітних регістрів.

Квантова акустика [21] може дати потужне прискорення до створення ембріональних квантових комп'ютерів. Такі машини функціонують на основі маніпуляцій з квантовими бітами або кубітами, які можуть бути встановлені в нуль, одиницю і невизначений стан. Найбільш просунуті кубіти створюють схеми на основі надпровідного металу для запису або зчитування даних шляхом використання мікрохвильового резонатора (cavity quantum electrodynamics – CQED). Він представлений смужкою металу в чіпі, де мікрохвильові фотони резонансно активують кубіти. Існує можливість заміни мікрохвильового резонатора механічним, який коливається з квантовими коливаннями або фононами. Мікромініатюрний акустичний резонатор може функціонувати довше, ніж мікрохвильовий, що дає можливість виробляти більш компактні квантові вироби. Однак тут існує проблема управління квантовими вібраціями, яка може бути вирішена вченими в найближчі 3 роки.

Квантова культура сучасного комп'ютинга показана в публікації Paul Teich, TIRIAS Research [22]. Тут представлені аналогії технологічного напівпровідникового поля інтегральних схем 50-річної давності, які на більш високому рівні, у вигляді поля квантових обчислень, повторюються у 2018 році.

Інтегральна схема на основі кремнію (IC) увійшла до фази «середньої» інтеграції у 1968 році. За кілька років IC піднялася від десяти транзисторів на чіпі до сотень. Подальше зростання ступеня інтеграції освоїло архітектурні рішення для тисяч транзисторів у чіпі, потім для користувачів стали доступними десятки тисяч, а сьогодні, через п'ятдесят років, технологія видає десятки мільярдів транзисторів в одному кристалі. Технологія перемагає фантазію.

Квантовий комп'ютинг – обчислювальний процес на основі використання квантової механіки для управління елементами пам'яті – субатомними частинками, охолодженими до температури, близької до абсолютного нуля. Субатомні примітиви пам'яті називаються «кубітами». Кубіти можуть бути виготовлені за допомогою технологій CMOS у вигляді стандартних IC. Але ланцюги з'єднання, управління і моніторингу, необхідні для створення квантових архітектур з великою кількістю кубітів у холодному робочому середовищі, вимагають розробки нових технологічних рішень.

Квантові обчислення в даний час використовують двозначну логіку кубіта. Рік 2017 відзначений появою універсального чіпа з 20 фізичними

кубітами. У 2018 році очікується комп'ютер з 50+ універсальними кубітами. Перші масові і ринковоорієнтовані квантові архітектури матимуть тисячу логічних кубітів, які забезпечать відмовостійкість на основі виявлення помилок в даних і їх корекції. Дані логічні властивості вимагають наявності на порядок більшого числа фізичних кубітів (10 000).

Еволюція структур даних від десятків до сотень фізичних кубітів може зайняти до 5 років. Для реалізації архітектур від сотень до тисяч кубітів потрібно більше десяти років. Квантова перевага неодмінно настане, але хотілося б раніше, ніж через 20 років.

Компанії IBM і Rigetti представили хмарні квантові (20- і 19-кубітні) комп'ютери загального призначення для публічного і приватного доступу з повним набором інструментів (devkit) з метою розробки програмного забезпечення. Компанія NTT (Nippon Telegraph and Telephone) представила хмарну архітектуру, засновану на квантовій крапці і photonics-based архітектурі, а також працюючу на її основі Quantum Neural Network для вирішення ринкових задач. Комп'ютер споживає всього 1 kW електроенергії в той час, як для роботи суперкомп'ютера необхідно 10 000 kW. Microsoft і Google показали свої програми R & D з квантових обчислень загального призначення, а також повнофункціональні devkits та симулятори, але поки не відкрили для публічного доступу своє апаратне забезпечення. Компанія Intel також показала прототипи чіпів без демонстрації їх можливостей. Існує багато інших лабораторій, таких, як IonQ, Quantum Circuits і RIKEN, що вкладають кошти в розробку квантової апаратури без демонстрації своїх результатів. Тільки дві компанії вже продають користувачам спеціалізовані апаратні системи, які можна назвати квантовими комп'ютерами: архітектуру квантового відпалу (annealing) для вирішення завдання пошуку глобального екстремуму в дискретному просторі D-Wave і квантовий імітатор Atos. D-Wave і NTT реалізують архітектуру з 2048 фізичних кубітів, використовуючи абсолютно різні технології для вирішення деяких задач комбінаторної оптимізації, молекулярної динаміки та глибокого навчання (deep learning training).

Simulating Quantum Iron. Для моделювання квантових архітектур на основі десятків фізичних кубітів потрібні потужні «класичні» IC-driven комп'ютери. Такі симулятори працюють на один-два порядки повільніше, ніж квантові комп'ютери. Проте дослідники мають намір створювати реальні потужні класичні системи для емуляції квантових архітектур і обчислень. Нещодавно (2017 рік) команда дослідників з двох університетів (Wuhan, Groningen) успішно змоделювала

46-кубітний універсальний квантовий комп'ютер і побила 45-кубітний рекорд, встановлений Energy's Lawrence Berkeley National Laboratory. Пізніше американська команда Harvard-MIT Center for Ultracold Atoms і California Institute of Technology змоделювала квантовий комп'ютер, об'ємом 51 кубіт для вирішення конкретного рівняння. Потім команда University of Maryland і US National Institute of Standards and Technology опублікувала статтю про 53-кубітний симулятор, який також призначений для вирішення конкретного завдання. Хмара IBM здатна моделювати на класичному суперкомп'ютері квантову систему із загальним обсягом 56 кубітів. Доступ користувачів до 16-кубітної обчислювальної структури є відкритим в рамках нової парадигми – програми Q Network. Новий Microsoft Quantum Development Kit підтримує моделювання більш 40 кубітів у хмарі Azure. При цьому локальна комп'ютерна симуляція може масштабуватися до 30 кубітів на 16 ГБ пам'яті. Симулятор Forrest від компанії Rigetti може імітувати архітектуру до 36 кубітів, в той час як квантовий майданчик Google може симулювати 22-кубітний обчислювач.

Компанія IBM задекларувала 20-кубітний чіп наприкінці 2017 року, який став основою для IBM Q Network програми. Далі IBM стверджує, що вона вже побудувала і внутрішньо протестувала 50-кубітний чіп. Учасники мережі IBM Q Network сьогодні мають доступ до 20-кубітних систем, а завтра отримають ранній доступ до 50-кубітного чіпу. Компанія Intel випустила тестовий чіп на 17 кубітів для партнера QuTech і показала 49-кубітний чіп в 2018 році на виставці Consumer Electronics Show (CES). Компанія Rigetti оголосила про хмарну доступність для користувачів 19 кубітів в архітектурі з 20 кубітами, де один з них має дефект. Корпорація Google протестувала чіпи з шістьма, дев'ятьма і 20 кубітами і працює над архітектурою з 49 кубітів. Компанія Atos інформувала, що її 40-кубітний симулятор, заснований на процесорах Intel Xeon, в даний час додатково використовує спеціалізовані апаратні прискорювачі. IBM також використовує свої Power Systems для імітації квантових комп'ютерів під час розробки.

Для створення програмного забезпечення вже є розвинені devkits з метою залучення дослідників до квантових архітектур, орієнтованих на ефективне вирішення специфічних комбінаторних задач. IBM відкрила для загального користування QASM (Quantum ASSEMBLER), який є ключовим компонентом QISKit IBM (Quantum Information Software Kit) [23]. Засіб XACC (EXCEL ACCELERATOR) взаємодіє з симулятором і прототипом квантового комп'ютера Rigetti, а також з обчислювальними системами D-Wave. QuTiP

(Quantum Toolbox in Python) [24] являє собою симулятор квантових обчислень з відкритим вихідним кодом, який використовується в сімействі квантових комп'ютерів (Alibaba, Amazon, Google, Honeywell, IBM, Intel, Microsoft, Northrup Grumman, Rigetti і RIKEN). QuTiP використовується для моделювання апаратних архітектур на стадії розробки. Google співпрацює з Rigetti на базі відкритого вихідного коду OpenFermion для компіляції з метою аналізу проблем квантової хімії. Microsoft представила користувачам мову квантового комп'ютинга Q # (Q-sharp).

Квантові комп'ютери використовують фізичні явища, що відбуваються в надзвичайно малих масштабах. Ринкова привабливість субатомної технології полягає в перевагах продуктивності і енергозбереження у порівнянні з класичними обчислювачами на базі напівпровідників. США щорічно витрачає близько 200 мільйонів доларів на дослідження і розробку квантових комп'ютерів, позиціонуючи їх як інфраструктуру для нової промислової революції. Японія виділила близько 267 мільйонів доларів для квантових обчислень протягом десятиліття, починаючи з 2018 року [25]. Китай оголосив про створення Національної лабораторії квантових інформаційних наук вартістю 10 мільярдів доларів, яку планується відкрити у 2020 році. Компанії Alibaba, Baidu і Tencent інвестували свої фінансові можливості до 2017 року в AI і Deep Learning, тому слід очікувати їх інвестиційний інтерес до квантових обчислень.

Компанія Microsoft почала працювати над квантовим комп'ютигом майже два десятиліття тому, в 2000 році. На заході Ignite Microsoft оголосила про програму квантових обчислень на майораном-ферміонів (Majorana Fermions, 2012 рік), де масштабування логічної кількості кубітів є на 1-2 порядки більш економічним і 10 фізичних кубітів доводиться на один логічний.

Microsoft фокусує свою активність на квантовому моделюванні нової мови Q #, інтегрованої у середовище розробки Visual Studio (IDE) і в інструменти моделювання квантових комп'ютерів, включаючи симулятор трасування для аналізу використання апаратних ресурсів. Microsoft також аносувала квантову оптимізацію Brainwave на базі FPGA-прискорювача для AI-рішень, що стосуються квантовізації глибокої нейронної мережі (DNN) для поліпшення точності і швидкості навчання. Інтеграція квантових обчислень з Visual Studio може залучити нове покоління академічних дослідників у бік від IDE з відкритим вихідним кодом, як Nvidia змогла зробити з програмуванням GPU через прикладний програмний інтерфейс CUDA (API).

IBM вже запустила свій QISKit API і devkit для розробників, щоб надати їм доступ до хмарних технологій Quantum Experience і локальних симуляторів. На додаток до цього IBM запустила проєкт з розвитку екосистеми Q Network. Учасниками проєкту є регіональні центри освіти, дослідження, розробки і комерціалізації: Keio University, University of Melbourne, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), University of Oxford, IBM Research, Daimler, JPMorgan Chase & Co, JSR, Samsung, Barclays, Honda, Materials Magic (Hitachi Metals Group) and Nagase.

Цільовими користувачами в Q-мережі IBM є аспіранти, академічні вчені та комерційні дослідники. Квантові обчислення все ще знаходяться на експериментальній стадії створення інфраструктури для програмування квантових комп'ютерів з метою вирішення практичних задач. Q-мережа використовується сьогодні у 1500 університетах, 300 приватних навчальних закладах і 300 вишах у межах їх навчальних програм з інженерії.

Попереду довгий шлях для комерціалізації квантових обчислень. У 2018 році ринок очікує системи з 50 або більше універсальними кубітами, а також спеціалізовані структури з 2000+ фізичними кубітами, що показують квантову перевагу у вузьких проблемних областях (International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing - QCMC).

Структура сучасного квантового комп'ютинга може бути представлена у вигляді пам'яті – хмар (множини) електронів, опромінюваних фотонами для формування двох примітивних станів (0,1), ідентифікованих орбітою або спіном частинки, і одного похідного від них $X=\{0,1\}$. При цьому хмари взаємодіють між собою, використовуючи логічні (теоретико-множинні) операції. Інша технологія використовує управління обертанням електрона у магнітному полі.

Спін електрона визначається як незалежні від руху частинки у просторі, момент імпульсу, який має два напрямки (рис. 3) [26]:

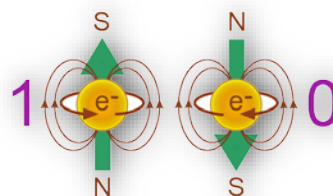


Рис. 3. Логічні стани спінів електрона у магнітному полі

обертання частинки проти годинникової стрілки, яке формує імпульс, що збігається з магнітним полем матеріалу (spin-up), що розглядається у квантовому комп'ютингу як логічна 1, і друге – обертання електрона за годинниковою стрілкою, яке

формує імпульс, який протидіє вектору намагніченості (spin-down), що формує логічний 0. Якщо помістити тонку пластину немагнітного матеріалу між двома магнітами, то струм, що протікає, створює поле, яке здатне орієнтувати спіни електронів середньої пластини з арсеніду галію в одному з двох напрямків, які використовуються для зберігання 0 і 1 (Stuart Parkin). Формується нова галузь квантової електроніки – спінтоніка, яка, на відміну від переміщення зарядів в електричному полі, заснована на використанні спінів електронів, інваріантних до поступального руху частинок у просторі. Основна перевага спінтоніки пов'язана з незмінюваністю кінетичної енергії частинки, що є причиною відсутності тепловиділення при зміні спіна, на яке практично не потрібно витрат енергії. Майбутнє комп'ютерів полягає у використанні сонячного світла в денній фазі доби, достатнього для підтримки працездатності. Недоліком слід вважати малий період стійкості спіна, рівний 100 пікосекундам, чого поки недостатньо для фіксації стану у квантовому комп'ютерингу. Однак вчені з IBM лабораторії вже розробили метод синхронізації електронів, збільшивши час стійкого існування спіна у 30 разів – до 1 наносекунди, що порівнянно з частотою мікропроцесора, яка дорівнює 1 GHz. Інший недолік пов'язаний з низькою температурою (мінус 233), при якій спіни електронів мінімально взаємодіють з навколишнім середовищем. Спінтоніка дає можливість управляти рухом елементарних магнітів у напівпровідникових пристроях і відкриває нові можливості для створення малогабаритної і енергозберігаючої електроніки для зберігання великих масивів даних у малому обсязі і паралельних квантових обчислень.

Архітектура сучасного квантового комп'ютера використовує спіни або орбіти електрона для зберігання логічних станів, перемикання яких управляється електромагнітними полями або фотонами у середовищі, близькому до абсолютного нуля. Така архітектура має два результати для проектування обчислювальних алгоритмів: 1) Реалізація квантової логіки на основі операцій суперпозиції і змішування для синтезу паралельних обчислювачів. 2) Використання операцій транзакції (read-write), вільних від квантової логіки, для програмування паралельних алгоритмів.

Суперкомп'ютер «Саміт», побудований IBM в 2018 році, займає площу, рівну двом тенісним кортам, і споживає 4 000 галонів води за хвилину для охолодження 37 000 процесорів. «Саміт» може забезпечити максимальну продуктивність 200 квадрильйонів обчислень за секунду (200 і 15 нулів) або 200 петафлоп. Це приблизно в мільйон

разів швидше, ніж ноутбук, і майже в два рази перевищує максимальну продуктивність самого популярного в Китаї Sunway TaihuLight. Суперкомп'ютер містить 28 000 графічних процесорів виробництва Nvidia і більш, ніж 9000 процесорів від IBM. Інтенсивне використання графічних чіпів, незвичайне для суперкомп'ютера, дозволяє забезпечити прориви в розгортанні машинного навчання з крутих наукових проблем, – каже Томас Захарія, директор Oak Ridge National Lab. «Ми побудували найпотужніший і найрозумніший в світі суперкомп'ютер» [27].

Що стосується енергоспоживання, то майбутнє комп'ютерингу полягає у використанні сонячного світла в денній фазі доби, достатнього для підтримки працездатності. Аргументом на користь цієї тези може слугувати публікація Euisik Yoon, Sung-Yun Park в журналі IEEE Spectrum 2018Apr "Self-Powered Image Sensor Could Watch You Forever" [28].

Основна ідея полягає в тому, що сонячні елементи (solar cells) і датчики зображення (image sensors) перетворюють світло в електрику. Якщо обидва компоненти розмістити в одному чіпі, то можна отримати автономну камеру (self-powered camera), що працює тільки від денного світла, яка здатна захопити 15 зображень в секунду. Мікросистема для відеозйомки і збору енергії, інтегрована з мікромініатюрним процесором і бездротовим приймачем, дає можливість поміщати маленьку, майже невидиму, камеру в будь-якому місці.

Інтегровані кремнієво-оптичні чіпи можуть усунути проблеми, пов'язані з низькою швидкістю металевих з'єднань між схемними компонентами. Optical CMOS process could break communications bottleneck.

Мілош Попович [29], професор електротехніки та обчислювальної техніки в Бостонському університеті разом з колегами з Массачусетського технологічного інституту, Каліфорнійського університету Берклі опублікували в Nature новий спосіб передачі оптичних сигналів на звичайних мікросхемах. Метод дозволяє прискорити на порядок зв'язок між мікропроцесорами, істотно зменшуючи тепловіддачу і збільшуючи обчислювальну продуктивність ноутбуків і смартфонів. Технологічна ідея полягає у додаванні матеріалу – тонкого шару діелектричного полікристалічного кремнію поверх існуючих компонентів кристала, виконаного за об'ємною комплементарною технологією. Щоб зробити матеріал більш відповідним для фотоніки, дослідники модифікували кристалічну структуру для запобігання витоку світла з їх полікристалічного кремнію на підкладку. Отримані кристали володіють усіма необхідними

фотонними компонентами: хвилеводами, мікро-резонаторами, вертикальними ґратчастими сполуками, високошвидкісними модуляторами, лавинними фотоприймачами і транзисторами, виконаними поки ще за технологією 65 нм. Джерело лазерного випромінювання знаходиться поза чіпом. Фотодетектори поглинають фотони. Мотивація дослідження полягає в тому, що виробники комп'ютерів все частіше використовують чіпи і графічні процесори для створення ігор і штучного інтелекту, які можуть містити сотні ядер. При цьому мідні дроти, що сполучають ядра, є основним вузьким місцем, стримуючим високу швидкість, які до того ж виробляють велику кількість тепла, що вимагає відводу у зовнішнє середовище. Металевий провідник може переносити дані від 10 до 100 гігабіт за секунду, а оптичне волокно – 10 до 20 терабіт за секунду. Слід також мати на увазі, що на мікровідстанях між мікро-процесорами теплові оптичні втрати практично дорівнюють нулю, тому опто-кремнієва система вимагає менших витрат енергії, ніж мідно-кремнієва. Новий метод може привести до створення чіпів з підвищеною обчислювальною потужністю для апаратної реалізації методів штучного інтелекту при розпізнаванні образів у iPhone і в недорогих датчиках LIDAR для driver-free автомобілів.

Пропонується однофотонний вентиль, як варіант створення твердотільного оптичного транзистора, де пропускання світла може управлятися одним фотоном, який діє як затвор або перемикач [30]. Використовується твердотільна система, що містить квантову точку, вбудовану в резонатор фотонного кристала, що дає можливість управляти світловим потоком в порожнині резонатора за допомогою одного фотона. Останній використовується для управління електронними рівнями енергії в квантовій точці, що змінює її оптичні властивості. Коли вентиль відкривається, в середньому через порожнину резонатора може проходити близько 28 фотонів, що демонструє однофотонне перемикання і посилення світлового потоку для оптичного транзистора.

Однофотонні перемикачі та транзистори генерують сильні фотон-фотон інтеракції, які необхідні для створення квантових схем і мереж. Однак для детермінованого управління оптичним сигналом за допомогою одного фотона необхідно взаємодіяти з квантовою пам'яттю, що важко досягти на твердотільній платформі. Проте автори демонструють однофотонний перемикач і транзистор, що взаємодіють з твердотільною квантовою пам'яттю. Пристрій складається з напівпровідникового спин-кубіта, сильно пов'язаного з нанофотонною порожниною. Спін-кубіт дозволяє одному 63-пікосекундному вентильному фотону

переключити множину сигналів, що містить в середньому 27,7 фотонів, до того, як внутрішній стан пристрою буде змінено. Результати показують, що напівпровідникові нанофотонні пристрої можуть створювати керовані фотон-фотон інтеракції, як фізичної основи фотонного квантового комп'ютинга для обробки інформації з високою пропускну здатністю.

«У цифровому світі екзабайти даних генеруються компаніями з виробництва, енергетики, телекомунікацій. Обсяг даних за останні 8 років виріс у 15 разів, а обчислювальна потужність центрів обробки даних збільшилася всього у 4 рази. Згідно з прогнозами IBM, кількість пристроїв, підключених до Інтернету, збільшиться у 7 разів за 3 роки і досягне 50 млрд. у 2020 році [31, 32]. Ця реальність збільшить розрив між обчислювальними потужностями центрів обробки даних і згенерованими даними. Для вирішення проблем зберігання і аналізу даних IoT компанії реплікують сервери баз даних, що призводить до складної інфраструктури, збільшення витрат, простору і енергоспоживання. Середня європейська компанія, яка виробляє продукцію, з річним доходом 50 млн євро витратить 158 тис. євро на створення дата-центрів і 85 тис. євро на рік для їх підтримки. Фірма Grovf пропонує інший архітектурний підхід для вирішення проблеми, де використовується FPGA структура як процесор. GData зростає швидше, ніж будь-коли раніше, і до 2020 року близько 1,7 мегабайт нової інформації буде створюватися кожну секунду для кожної людини на планеті. Відповідно до нового звіту IBM Marketing Cloud «10 ключових тенденцій в маркетингу на 2017 рік», 90% даних у світі сьогодні створено за останні два роки. Сервер баз даних Alogvf використовує FPGAAccelerator для обробки даних NoSQL, що надходять від датчиків IoT. Прототип вже досяг 10-кратного прискорення транзакцій і 31-кратної економії енергії у порівнянні з найсучаснішими існуючими апаратними рішеннями. Основними цілями запропонованої архітектури є: 1) Впровадження нової, дзірапторної технології для управління даними в індустрії IoT. 2) Різке зниження енергоспоживання дата-центрів. 3) Забезпечення швидкої, недорогої і надійної локально-хмарної технології для індустрії IoT. 4) Оптимізація поточної завантаженості існуючих центрів обробки даних. 5) Допомога середнім виробникам-компаніям в енергетиці, логістиці та телекомунікаціях у скороченні витрат на IT-інфраструктуру при створенні конкурентоспроможних підприємств.

4. Висновки

Аналітичний огляд публікацій в області тестування і верифікації спеціалізованих логічних схем шляхом розробки паралельних квантових методів

аналізу і синтезу кубітних структур даних цифрових систем дає підстави зробити такі висновки: 1) Тенденція квантового комп'ютинга підтримується в актуальному стані протягом останніх п'яти років, про що свідчить Gartner Hype Cycle 2018. 2) Практично всі провідні компанії ІТ-галузі вкладають ресурси в розробку ринково затребуваного квантового комп'ютера на основі використання субатомних структур даних і логічних відносин між ними. 3) Як мінімум, 30 відсотків коштів припадає на розробку паралельних алгоритмів, орієнтованих на імплементацію в квантові обчислювачі, які з'являться у найближчі 5 років. 4) Особливий ринковий інтерес викликають алгоритми паралельного вирішення завдань комбінаторики за напрямками: Design and Test, Cyber Security, Bio-engineering, Ecology, Transportation. 5) Ринок також цікавиться імплементацією паралельних квантових алгоритмів на кубітних структурах даних, емульованих в класичні комп'ютери, які мають більш високу швидкодію за рахунок використання надлишкової пам'яті. 6) Актуальними також залишаються дослідження в області memory-driven комп'ютинга, без використання окремого процесора з шиною обміну даними, яка істотно зменшує швидкодію. Виходячи з представленого вище, далі формуються мета і завдання дослідження, спрямовані на вирішення науково-практичного завдання синтезу і моделювання квантових паралельних алгоритмів технічної діагностики на класичних комп'ютерах.

Мета дослідження – зменшення часу верифікації цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних Х-функцій та істотного підвищення продуктивності методів тестування і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютинга алгоритмів.

Завдання дослідження:

- 1) Розробити memory-driven архітектури та алгоритми для паралельного виконання логічних операцій над кубітними структурами даних при реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах.
- 2) Удосконалити квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій шляхом синтезу матриць булевих похідних за їх кубітним покриттям.
- 3) Розробити структурну модель метричних властивостей Х-функцій, орієнтовану на виконання паралельних операцій, з метою отримання лінійного часу генерації тестів і моделювання цифрових систем.
- 4) Розробити аналітичну модель для отримання кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних з метою створення логічних схем,

які не потребують експоненційних витрат на синтез і аналіз тестів.

- 5) Розробити паралельний метод генерації тестів для несправностей Х-функцій від кінцевого числа змінних на основі взяття похідних за кубітним покриттям, які формують тести мінімальної довжини.

- 6) Розробити паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання Х-функцій на основі отримання одиначної матриці похідних з метою створення секвенсора моделювання дефектів.

Виконання досліджень і проведення експериментів ґрунтується на використанні метрики параметрів, інтегрованої в функцію мети:

$$L = \min \left(\sum_{i=1}^n T_i \times P_i^T + \sum_{i=1}^n M_i \times P_i^M + \sum_{i=1}^n C_i \times P_i^C \right),$$

$$T = (T_{\text{mod}}, T_{\text{tpg}}, T_{\text{tver}}, T_{\text{sim}}); n = 4;$$

$$M = (M_{\text{mod}}, M_{\text{tpg}}, M_{\text{tver}}, M_{\text{sim}});$$

$$C = (C_{\text{mod}}, C_{\text{tpg}}, C_{\text{tver}}, C_{\text{sim}}).$$

Формула показує зменшення часу Т проектування цифрових систем на кристалах і забезпечення якості (обчислювальної складності) алгоритмів С за рахунок використання надлишкової пам'яті М для зберігання кубітних структур даних, які орієнтовані на паралельне виконання логічних операцій при синтезі і аналізі логічних схем, пов'язаних з тестуванням і верифікацією. Представлені вартісні характеристики Р чотирьох основних процесів, пов'язаних з modeling (mod), test pattern generation (tpg), test verification (tver), test simulation (sim).

Література:

1. *5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies*, 2018. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/> (Дата звернення: 30.10.2018).
2. *Kharchenko V. Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures: In the book series "Studies in Systems, Decision and Control" (SSDC) / V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.). Vol. 1. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2017.*
3. *Kharchenko V. Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation: In the book series "Studies in Systems, Decision and Control" (SSDC) / V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.). Vol. 2. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2017.*
4. *Gupta A. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies / A. Gupta, R. K. Jha. In IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 1206-1232.*
5. *Top 10 Strategic Technology Trends for 2019.* URL: https://www.gartner.com/doc/3891569?src=Id=1-7251599992&cm_sp=swg_-_gi_-_dynamic (Дата звернення: 30.10.2018).

6. Gartner Identifies Three Megatrends That Will Drive Digital Business Into the Next Decade. URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3784363> (Дата звернення: 30.10.2018).
7. *Christidis K.* Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things / K. Christidis, M. Devetsikiotis. In IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 2292-2303.
8. *Blockchains: How They Work and Why They'll Change the World* IEEE Spectrum. October 2017. URL: <https://spectrum.ieee.org/computing/networks/blockchains-how-they-work-and-why-theyll-change-the-world> (Дата звернення: 30.10.2018).
9. *Zanella A. A.* Internet of Things for Smart Cities / A. A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, M. Zorzi. In IEEE IoT Journal. Feb. 2014. Vol. 1, no. 1. P. 22-32.
10. *Hahanov V.* Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. New York: Springer, 2018.
11. *Hahanov V.I.* Qubit technology for analysis and diagnosis of digital devices / V.I. Hahanov, T. Bani Amer, S.V. Chumachenko, E.I. Litvinova. In Electronic modeling. 2015. No 37 (3). P. 17-40.
12. *Hahanov V.* Quantum memory-driven computing for test synthesis / V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova, M. Liubarskyi, A. Hahanova. In IEEE East-West Design and Test Symposium. Novi Sad, Serbia. 2017. P. 123-128.
13. *Zhong T.* Nanophotonic rare-earth quantum memory with optically controlled retrieval / T. Zhong, J. M. Kindem, J. G. Bartholomew et al. In Science. 29 Sep 2017. Vol. 357, iss. 6358. P. 1392-1395.
14. *Kim J.* Photon-triggered nanowire transistors / J. Kim, H.-Ch. Lee, K.-H. Kim et al. In Nature Nanotechnology. 2017. No 12. P. 963-968.
15. *Lovat G.* Room-temperature current blockade in atomically defined single-cluster junctions / G. Lovat, B. Choi, D. W. Paley et al. In Nature Nanotechnology. Nov12(11). 2017. P. 1050-1054.
16. *Li Ch.* Conformation-based signal transfer and processing at the single-molecule level / Ch. Li, Zh. Wang, Y. Lu, X. Liu, L. Wang. In Nature Nanotechnology. 2017. Vol. 12. P. 1071-1076.
17. *Quantum photonic researchers start new company, Sparrow Quantum.* URL: <http://www.nbi.ku.dk/english/news/news16/quantum-photonic-researchers-start-new-company-sparrow-quantum/> (Дата звернення: 30.10.2018).
18. *Ion Q Raises \$20M Series B Round Led By NEA, GV To Advance Quantum Computing For Commercial Applications.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/ionq-raises-20m-series-b-round-led-by-nea-gv-to-advance-quantum-computing-for-commercial-applications-300494456.html> (Дата звернення: 30.10.2018).
19. *Hutan R.* Weird quantum particles simulated in droplet of ultracold gas. URL: http://www.sciencemag.org/news/2018/03/weird-quantum-particles-simulated-droplet-ultracold-gas?utm_campaign=news_daily_2018-03-06&et rid=69734703&et cid=1891545 (Дата звернення: 30.10.2018).
20. *Samkharadze N.* Strong spin-photon coupling in silicon / N. Samkharadze, G. Zheng et al. In Science. 2018. Vol. 359, iss. 6380. P. 1123-1127.
21. *Cho A.* Vibrations used to talk to quantum circuits. In Science. 2018. Vol. 359, iss. 6381. P. 1202-1203.
22. *P. Teich.* Quantum Computing Enters 2018 Like it is 1968. URL: <https://www.nextplatform.com/2018/01/10/quantum-computing-enters-2018-like-1968/> (Дата звернення: 30.10.2018).
23. *QISKit* for quantum computation. 2018. URL: <https://www.ibm.com/blogs/research/2018/02/qiskit-index/> (Дата звернення: 30.10.2018).
24. *QuTiP.* Quantum Toolbox in Python. URL: <http://qutip.org> (Дата звернення: 30.10.2018).
25. *Japan enters quantum computing race -- and offers free test drive.* URL: <https://asia.nikkei.com/Tech-Science/Tech/Japan-enters-quantum-computing-race-and-offers-free-test-drive> (Дата звернення: 30.10.2018).
26. *The Application of Spintronics.* URL: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/spintronics/> (Дата звернення: 30.10.2018).
27. *IBM's world-class Summit supercomputer goes speed with AI abilities.* 2018. URL: <https://www.cnet.com/news/ibms-world-class-summit-supercomputer-goes-speed-with-ai-abilities/> (Дата звернення: 30.10.2018).
28. *Moore S. K.* Self-Powered Image Sensor Could Watch You Forever. URL: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/optoelectronics/self-powered-image-sensor-could-watch-you-forever?utm_source=sensors&utm_campaign=sensors-04-17-18&utm_medium=email (Дата звернення: 30.10.2018).
29. *Supercharging Chips by Integrating Optical Circuits.* URL: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/optoelectronics/optics-on-chips-could-speed-up-computing?utm_source=computingtechnology&utm_campaign=computingtechnology-05-01-18&utm_medium=email (Дата звернення: 30.10.2018).
30. *Sun S.* A single-photon switch and transistor enabled by a solid-state quantum memory / S. Sun, H. Kim, Z. Luo, G. S. Solomon, E. Waks. In Science. 06 Jul 2018. Vol. 361, issue 6397. P. 57-60. URL: <https://www.mram-info.com/stt-mram> (Дата звернення: 30.10.2018).
31. *10 Key Marketing Trends for 2017.* URL: <https://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=WRL12345USEN> (Дата звернення: 30.10.2018).
32. *Zhu C.* Green Internet of Things for Smart World / C. Zhu, V. C. M. Leung, L. Shu, E. C. H. Ngai. In IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 2151-2162.

Надійшла до редколегії 17.12.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Мелікян В.

Любарський Михайло Михайлович, здобувач кафедри АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: проектування і тестування цифрових систем. Хобі: подорожі. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14.

Хаханов Володимир Іванович, д-р техн. наук, професор, головний науковий співробітник кафедри АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: проектування і тестування цифрових систем. Хобі: футбол, гірські лижі. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14, e-mail: hahanov@icloud.com.

Хаханов Іван Володимирович, магістрант кафедри АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: технічна діагностика цифрових систем, програмування. Хобі: гірські лижі, англійська мова. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14, тел. + 3805770-21-326, e-mail: ivanhanov@icloud.com.

Чумаченко Світлана Вікторівна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: математичне моделювання обчислювальних процесів, теорія рядів, методи дискретної оптимізації, інноваційні форми навчання. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14, тел. +380577021326, e-mail: svetlana.chumachenko@nure.ua

Lyubarsky Mikhail Mikhailovich, PhD student, Design Automation Department, NURE. Scientific interests: project-bathing and testing digital systems. Scientific interests: design and testing of digital systems. Hobbies: traveling. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave, 14.

Hahanov Vladimir Ivanovich, Dr., Prof., Chief Scientific Researcher, Design Automation Department, NURE. Scientific interests: design and testing of digital systems. Hobby: football, downhill skiing. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave, 14, e-mail: hahanov@icloud.com.

Hahanov Ivan Vladimirovich, student, Design Automation Department, NURE. Scientific interests: technical diagnostics of digital systems, programming. Hobby: mountain skiing, English. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave., 14, ph. + 3805770-21-326, e-mail: ivanhanov@icloud.com.

Chumachenko Svetlana Victorovna, Dr., Prof., Head of Design Automation Department, NURE. Scientific interests: mathematical modeling of computational processes, theory of series, methods of discrete optimization, educational innovations. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave, 14, phone + 3805770-21-326, e-mail: svetlana.chumachenko@nure.ua