

УДК 530.145:004.8:004.056:517.9

Живило Є.О., к.н. з держ.упр., доцент

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»*

НЕЛІНІЙНІ КВАНТОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В АДАПТИВНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням складності електронно-комунікаційних систем, зокрема тих, що використовуються в критично важливих інфраструктурах та мережах Сил оборони і безпеки України. Інтенсивна цифровізація, перехід до сервісно-орієнтованих і розподілених архітектур, інтеграція гетерогенних мереж зв'язку, а також зростаюча роль автоматизованих систем підтримки прийняття рішень формують принципово нові вимоги до стійкості, надійності та безпеки обчислювальних процесів.

Додатковим чинником ускладнення є постійна дія багатofакторної невизначеності, що включає випадкові шумові процеси, цілеспрямовані кібернетичні та фізичні атаки, обмеженість обчислювальних і енергетичних ресурсів, а також динамічну зміну топології та параметрів мереж [1]. У таких умовах класичні підходи до проектування та аналізу інформаційних систем дедалі частіше виявляються недостатніми, що стимулює пошук нових парадигм обчислень і керування.

Одним із перспективних напрямів є використання квантових та гібридних квантово-класичних технологій. Розвиток квантових обчислень, квантових комунікацій і постквантових криптографічних механізмів зумовлює необхідність формування математичних моделей, здатних адекватно описувати еволюцію квантових станів у відкритих, керованих і адаптивних системах [2]. Особливого значення набувають нелінійні квантові інформаційні процеси, які виникають унаслідок взаємодії системи з середовищем, процедур вимірювання та контурів зворотного зв'язку.

У класичній квантовій механіці еволюція ізольованої системи описується лінійним рівнянням Шредінгера або, у випадку змішаних станів, лінійним рівнянням фон Неймана. Проте реальні обчислювальні системи є відкритими та функціонують у взаємодії з середовищем, що призводить до появи дисипації, декогеренції та стохастичних ефектів. Додатково, в адаптивних системах результати вимірювань використовуються для корекції подальшої еволюції, формуючи контури активного зворотного зв'язку.

Саме наявність таких контурів зворотного зв'язку є ключовою причиною виникнення ефективної нелінійності квантової динаміки. Нелінійність у цьому контексті не суперечить фундаментальним постулатам квантової механіки, а є наслідком умовної еволюції стану, параметричної залежності гамільтоніана від поточного стану та адаптивного керування процесами вимірювання й обробки інформації.

Таким чином, нелінійні квантові інформаційні процеси слід розглядати як природний інструмент опису функціонування адаптивних обчислювальних систем нового покоління, у яких квантова динаміка, інформаційні потоки та алгоритми керування утворюють єдину взаємопов'язану систему.

Простір станів та адаптація. Нехай стан складеної квантової системи описується щільнісним оператором

$$\rho(t) \in D(H), \quad H = \bigotimes_{i=1}^N H_i, \quad (1)$$

де H – гільбертів простір складеної системи, а $D(H)$ – множина допустимих квантових станів. Такий підхід дозволяє коректно враховувати як чисті, так і змішані стани, а також ефекти декогеренції та шуму. За цих умов адаптація в системі реалізується через вектор керування

$$\mathbf{u}(t) \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m \quad (2)$$

визначає параметри гамільтоніана, операторів вимірювання, а також характеристики квантових каналів і класичних обчислювальних процедур. На відміну від статичних схем керування, у розглянутому підході вектор $\mathbf{u}(t)$ формується динамічно на основі поточного стану системи та результатів проміжних вимірювань. Це забезпечує можливість оперативної реакції на зміну зовнішніх умов і внутрішнього стану системи.

Узагальнене рівняння нелінійної квантової динаміки. Для опису еволюції стану адаптивної квантової системи доцільно використовувати узагальнене нелінійне рівняння Ліндблада, у якому як унітарна, так і дисипативна частини динаміки можуть залежати від стану системи

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = -i \left[H_0 + \sum_j u_j(t) H_j + H_{nl}(\rho(t)), \rho(t) \right] + \sum_k \gamma_k(\rho(t), \mathbf{u}(t)) (L_k(\rho(t)) \rho L_k^\dagger(\rho(t)) - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho\}) \quad (3)$$

де H_0 – базовий гамільтоніан, H_j – керуючі гамільтоніани, $H_{nl}(\rho)$ – стан-залежний нелінійний гамільтоніан, $L_k(\rho)$ та $\gamma_k(\rho, \mathbf{u})$ визначають нелінійні дисипативні процеси та вплив середовища.

Така модель дозволяє врахувати вплив керуючих дій, умовних вимірювань і нелінійних ефектів, що виникають у процесі адаптації.

Нелінійний характер рівняння відображає використання інформації про стан системи для корекції її подальшої еволюції. З математичної точки зору це призводить до ускладнення аналізу стійкості та оптимальності, проте водночас відкриває можливості для більш гнучкого й ефективного керування квантовими інформаційними процесами.

Постановка задачі оптимального керування. Виконання завдання у межах запропонованої моделі є синтез закону адаптивного керування $\mathbf{u}^*(t)$, який забезпечує оптимальну еволюцію стану $\rho(t)$ протягом інтервалу часу $t \in [0, T]$, починаючи з $\rho(0) = \rho_0$. Тому цільова функція має вигляд:

$$J(\mathbf{u}) = \mathbb{E}[\Phi(\rho(T), \rho_{target}) + \int_0^T (\mathcal{C}(\rho(t)) + \lambda \mathcal{R}(\mathbf{u}(t))) dt], \quad (4)$$

де Φ – відхилення кінцевого стану від цільового, $\mathcal{C}(\rho)$ – поточний функціонал якості (когерентність, ентропія, точність обчислень), $\mathcal{R}(\mathbf{u})$ – регуляризація витрат ресурсів, а λ – коефіцієнт компромісу між точністю та витратами керування. Саме введення інтегральної цільової функції дозволяє систематично аналізувати компроміси між ефективністю обчислень, стійкістю до зовнішніх впливів і вартістю керування. Це є особливо важливим для систем оборонного призначення, де ресурси є обмеженими, а вимоги до надійності та безпеки – критично високими [3].

Інтеграція з варіаційними квантовими алгоритмами та квантовими нейромережами. У випадку варіаційних квантових алгоритмів стан системи параметризується як

$$\rho(\theta) = U(\theta)\rho_0 U^\dagger(\theta), \quad (5)$$

де θ – вектор варіаційних параметрів. Оновлення θ на основі вимірювань реалізує нелінійну адаптацію системи відповідно до цільової функції. Аналогічні погляди застосовуються й у квантових нейромережах, де параметри керування інтерпретуються як вагові коефіцієнти, а нелінійність динаміки відіграє роль функцій активації. Отже це створює передумови для використання квантових методів машинного навчання в задачах обробки інформації, прогнозування та підтримки прийняття рішень у складних динамічних середовищах.

Розглянутий підхід формує теоретичне підґрунтя для розроблення адаптивних квантових і гібридних квантово-класичних обчислювальних систем, орієнтованих на роботу в умовах інтенсивних зовнішніх збурень і загроз. Зокрема, він може бути використаний для аналізу та синтезу систем захищеного зв'язку, квантово-стійких механізмів автентифікації, а також інтелектуальних систем керування в оборонних інформаційних інфраструктурах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення стійкості запропонованих моделей до різних класів атак [4], розроблення чисельних методів розв'язання нелінійних рівнянь квантової динаміки та експериментальну верифікацію ефективності адаптивних квантових алгоритмів у реальних або наближених до реальних умовах функціонування.

Список використаних джерел:

1. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2025). ISO/IEC 24760-1:2025 Information security, cybersecurity and privacy protection – A framework for identity management. Part 1: Core concepts and terminology (3rd ed.). <https://www.iso.org/standard/24760-1>.

2. Фесенко, Т., та Калашникова, Ю. (2025). Математичні аспекти спільного застосування алгоритму AES та стеганографічних методів у захисті ключів автентифікації. Збірник «Інформаційні технології та безпека», 13 (2), 178–191. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2025.13.2.344592>.

3. Фесенко Т., Калашнікова Ю. Використання Cisco SecureX для SOC-автоматизації. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. № 4 (82). С. 138–143. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.138>. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/4119> (дата звернення: 04.02.2026).

4. NIST: Post-Quantum Cryptography (PQC) Project і NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards, <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>.