



DOI 10.28925/2663-4023.2026.32.1117

УДК 004.93:530.145

Лемешко Андрій Вікторович

PhD, доцент,

доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки

Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-8003-3168

a.lemeshko@knute.edu.ua

Краснощок Віктор Миколайович

Кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри прикладних інформаційних систем

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-0967-9131

krasnoshchokvictor@knu.ua

Десятко Альона Миколаївна

PhD, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки

Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-2860-2188

desyatko@gmail.com

ТЕМПОРАЛЬНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ КВАНТОВОЇ ДЕКОГЕРЕНЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. У статті розглянуто проблему фізичної інтерпретації квантової декогеренції, яка традиційно описується в межах феноменологічних моделей взаємодії квантової системи з середовищем. Показано, що стандартні підходи ефективно відтворюють динаміку фазового загасання, однак не надають пояснення фізичного походження втрати когерентності. Запропоновано темпоральну інтерпретацію декогеренції, у межах якої фазове загасання розглядається як наслідок порушення часової синхронізації в неоднорідному часовому середовищі. У роботі продемонстровано, що запропонований підхід формально узгоджується з апаратом матриці густини та рівняннями типу Ліндблада, відтворюючи стандартні експоненційні закони декогеренції. Обґрунтовано, що стохастичні та немарковські ефекти можуть бути інтерпретовані як прояви часових кореляцій та повільного темпорального дрейфу. Практична цінність дослідження полягає у можливості застосування запропонованої інтерпретації для аналізу шумів, пам'яті та стабільності фазової динаміки в складних інформаційних і квантових системах.

Ключові слова: квантова декогеренція; фазове загасання; темпоральна модель; часова синхронізація; матриця густини; стохастичні збурення; немарковська динаміка; інформаційні системи; фазова когерентність.

ВСТУП

Актуальність дослідження. Проблема квантової декогеренції є однією з ключових у сучасній квантовій фізиці та теорії складних інформаційних систем. Втрата фазової когерентності визначає межі застосовності квантових ефектів, впливає на стабільність квантових станів і суттєво обмежує ефективність квантових обчислень, сенсорних технологій та високоточної часової синхронізації. У ширшому контексті декогеренція розглядається як універсальний механізм переходу від когерентної динаміки до класичної поведінки [1-4], що має безпосереднє значення для аналізу шумів, пам'яті та стійкості фазової динаміки в складних інформаційних системах [2, 3, 4].



Попри значний прогрес у математичному описі процесів декогеренції, питання фізичної природи втрати когерентності залишається актуальним. Зокрема, потребує уточнення роль часових кореляцій [9, 10], немарковських ефектів та глобальних факторів, які не зводяться до локальної взаємодії з середовищем. Це зумовлює необхідність пошуку альтернативних інтерпретацій, здатних доповнити стандартні феноменологічні підходи.

Постановка проблеми. У стандартній теорії відкритих квантових систем [6] декогеренція описується як наслідок взаємодії квантової системи з неконтрольованим середовищем. Такий підхід ефективно відтворює експериментально спостережуване фазове загасання та лежить в основі рівнянь типу Ліндблада [6-8]. Водночас параметри шуму та коефіцієнти декогеренції в більшості випадків вводяться феноменологічно або визначаються з експериментальних даних без чіткого фізичного пояснення їх походження.

Особливо проблематичним є опис немарковських режимів, у яких спостерігаються довготривалі часові кореляції, ефекти пам'яті та відхилення від експоненційних законів загасання. Існуючі моделі, орієнтовані виключно на середовищні фактори, не завжди дозволяють узгоджено інтерпретувати ці явища [9, 10]. Таким чином, постає наукова проблема розширення інтерпретаційної бази декогеренції без зміни формального апарату квантової механіки.

Аналіз попередніх досліджень. Теоретичні основи декогеренції сформовані в межах підходу відкритих квантових систем [6], де ключову роль відіграють матриця густини, оператори редукції та марковські й немарковські майстер-рівняння. Класичні роботи з теорії декогеренції заклали математичний апарат для опису фазового загасання та переходу до класичної поведінки [1-4]. Подальші дослідження розширили цей підхід на немарковські режими, запропонувавши узагальнені рівняння еволюції з урахуванням часових кореляцій.

Разом з тим, більшість існуючих робіт зосереджена на операційному описі процесів і не ставить за мету з'ясування фізичного походження самої втрати когерентності. Немарковські ефекти, низькочастотні шуми та часово корельовані збурення, як правило, інтерпретуються як наслідок складної структури середовища. Це залишає відкритим питання про можливі глобальні або структурні чинники, які впливають на фазову динаміку квантових та інформаційних систем.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування темпоральної інтерпретації квантової декогеренції, у межах якої фазове загасання розглядається як наслідок порушення часової синхронізації. Робота спрямована на показ формальної узгодженості запропонованого підходу зі стандартним апаратом квантової механіки та на аналіз його застосовності для інтерпретації шумів, немарковських ефектів і стабільності фазової динаміки в складних інформаційних системах.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПИСУ ДЕКОГЕРЕНЦІЇ

1.1. Декогеренція у стандартній квантовій теорії.

У стандартній квантовій теорії декогеренція описується в межах формалізму матриці густини, який дозволяє коректно враховувати як чисті, так і змішані квантові стани. Для ізольованої системи еволюція матриці густини визначається рівнянням фон Неймана та є унітарною, що забезпечує збереження квантової когерентності. Проте у реалістичних умовах квантові системи неминуче взаємодіють з неконтрольованими



зовнішніми ступенями свободи, що зумовлює необхідність переходу до опису відкритих квантових систем.

У цьому контексті декогеренція проявляється як загасання недіагональних елементів матриці густини у певному базисі, що призводить до зникнення інтерференційних ефектів. Таке фазове загасання зазвичай не супроводжується істотною зміною діагональних елементів, які відповідають імовірностям спостережуваних станів. Саме ця властивість дозволяє інтерпретувати декогеренцію як механізм переходу від квантової до квазікласичної поведінки без введення додаткових постулатів колапсу хвильової функції [2-4].

Середовищні моделі декогеренції пов'язують втрату когерентності з процесом заплутування системи з оточенням. У таких моделях фаза квантового стану стає недоступною для спостереження внаслідок розсіювання інформації у великій кількості зовнішніх ступенів свободи. Хоча цей підхід є надзвичайно успішним з операційної точки зору, він, як правило, не розкриває фізичну природу параметрів, що визначають швидкість і характер фазового загасання [3, 13].

1.2. Марковські та немарковські режими.

Для практичного опису динаміки відкритих квантових систем широко використовується марковське наближення, у межах якого вважається, що кореляції середовища згасають значно швидше, ніж характерні часові масштаби еволюції системи. За цих умов динаміка матриці густини може бути представлена у вигляді майстер-рівнянь типу Ліндблада, які забезпечують повну позитивність та збереження нормування стану [6-8].

Формалізм Ліндблада дозволяє ефективно моделювати процеси фазового загасання [3, 13], релаксації та дисипації, вводячи відповідні оператори шуму та коефіцієнти швидкості. Проте ці коефіцієнти зазвичай мають феноменологічний характер і визначаються або шляхом апроксимації експериментальних даних, або через спрощені моделі взаємодії з середовищем.

У багатьох фізичних та інформаційних системах марковське наближення виявляється недостатнім. Експериментально спостерігаються немарковські режими, для яких характерні ефекти пам'яті, зворотного потоку інформації та корельовані шумові процеси. Такі режими особливо притаманні твердотільним квантовим системам, надпровідниковим кубітам та системам з повільними флуктуаціями параметрів. Хоча існують узагальнені немарковські майстер-рівняння, фізичне походження відповідних кореляційних коефіцієнтів часто залишається не до кінця з'ясованим [9, 10].

1.3. Концептуальні обмеження існуючих підходів.

Незважаючи на успішність стандартної теорії декогеренції, вона має низку концептуальних обмежень. По-перше, фазова когерентність у квантовій теорії не пов'язана з жодною збереженою фізичною величиною, що робить її принципово вразливою до навіть слабких збурень. По-друге, параметри шуму та декогеренції вводяться, як правило, феноменологічно й не мають однозначної інтерпретації на рівні фундаментальних фізичних механізмів.

Крім того, стандартні середовищні моделі пояснюють, як відбувається декогеренція, але залишають відкритим питання, чому фазова когерентність виявляється настільки універсально нестійкою в різних фізичних платформах і за різних типів середовища. Особливо це питання загострюється у випадках немарковської динаміки та корельованих шумів, де традиційні припущення про локальність і миттєвість взаємодій втрачають обґрунтованість.



Зазначені обмеження мотивують пошук альтернативних інтерпретаційних підходів, які зберігали б формальний апарат стандартної квантової теорії, але водночас надавали б фізично змістовне пояснення походження фазового загасання, часових кореляцій [9, 10] і немарковських ефектів. Саме така мотивація лежить в основі темпоральної інтерпретації декогеренції, що розглядається в наступних розділах роботи.

2. ТЕМПОРАЛЬНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ФАЗОВОЇ ДИНАМІКИ

2.1. Час як ефективна фізична структура.

У стандартних формулюваннях квантової механіки час розглядається як зовнішній параметр, що впорядковує еволюцію фізичних систем, але сам не має власної динаміки. Такий підхід є достатнім для побудови формального апарату теорії, однак він залишає відкритим питання про фізичний зміст часових масштабів, фазових зсувів та кореляцій, які спостерігаються в реальних системах.

У межах даного дослідження час розглядається як ефективна фізична структура, що характеризує локальні умови фазової еволюції квантових та інформаційних систем. Йдеться не про введення нового фундаментального об'єкта, а про інтерпретаційний рівень опису, який дозволяє узгодити формальні часові параметри з фізично спостережуваними ефектами, такими як дрейф фаз, корельований шум та немарковська динаміка. У цьому сенсі часові характеристики системи можуть залежати від просторових, динамічних та середовищних факторів, що визначають умови її еволюції.

Такий підхід узгоджується з сучасними уявленнями про роль часу в складних динамічних системах і не суперечить стандартному формалізму квантової теорії. Часовий параметр зберігається як координата еволюції, проте його ефективні властивості допускають неоднорідність і флуктуації, які можуть мати фізичні наслідки для фазової динаміки [14].

2.2. Локальна фазова еволюція в неоднорідному часовому середовищі.

Фаза квантового стану є чутливою до часових характеристик еволюції системи. У разі однорідних умов фазова еволюція відбувається узгоджено для всіх компонентів стану, що забезпечує збереження інтерференційних властивостей. Проте в реалістичних умовах часові характеристики можуть відрізнятися для різних просторових або динамічних компонентів системи.

У рамках темпоральної інтерпретації вважається, що локальні варіації часових умов призводять до накопичення взаємно неузгоджених фазових зсувів. Такі зсуви можуть виникати внаслідок повільних флуктуацій параметрів середовища, дрейфу керуючих сигналів або просторової неоднорідності часових масштабів у складних системах. Важливо підкреслити, що ці ефекти не потребують введення стохастичних припущень на фундаментальному рівні, а можуть розглядатися як наслідок ефективної часової неоднорідності.

У результаті локальна фазова еволюція стає різною для окремих компонентів квантового стану. При переході до опису з використанням редукованої матриці густини такі відмінності проявляються як фазове загасання, що формально еквівалентне стандартним моделям декогеренції. Таким чином, неоднорідність часових умов може бути розглянута як один з механізмів втрати когерентності без зміни основних постулатів квантової теорії.

2.3. Умова глобальної фазової синхронізації.

З позиції темпоральної інтерпретації квантова когерентність відповідає стану глобальної фазової синхронізації. За таких умов фазові зсуви, що накопичуються в



процесі еволюції системи, залишаються узгодженими між усіма її компонентами, що забезпечує збереження інтерференційних ефектів та кореляцій.

Порушення цієї синхронізації відбувається тоді, коли локальні часові відмінності перевищують певний критичний рівень, за якого фазові зсуви стають несумісними в глобальному описі системи. У такому випадку інтерференційні члени матриці густини ефективно пригнічуються, що інтерпретується як декогеренція. Важливо зазначити, що в межах цього підходу декогеренція не ототожнюється з фундаментальною втратою інформації, а розглядається як наслідок порушення умов фазової узгодженості.

Запропоноване трактування дозволяє інтерпретувати марковські та немарковські режими як різні сценарії втрати фазової синхронізації. У марковському випадку порушення синхронізації відбувається швидко та без виражених кореляцій у часі, тоді як у немарковських режимах зберігаються залишкові часові кореляції, що проявляються у вигляді ефектів пам'яті та зворотного потоку інформації. Такий підхід створює концептуальне підґрунтя для єдиного опису декогеренції, шуму та часових кореляцій у квантових та інформаційних системах.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ДЕКОГЕРЕНЦІЇ ЯК ПОРУШЕННЯ ЧАСОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

3.1. Індуковане фазове загасання.

Розглянемо квантову систему, фазова еволюція якої визначається ефективними часовими умовами. У стандартному випадку фаза стану з кутовою частотою ω накопичується як:

$$\varphi(t) = \omega \cdot t \quad (1)$$

У разі наявності локальних часових відхилень фазова еволюція може бути записана у вигляді:

$$\varphi(t) = \omega \cdot (t + \delta\tau(t)) \quad (2)$$

де $\delta\tau(t)$ описує повільні флуктуації або неоднорідності ефективного часу.

Різні компоненти квантового стану накопичують фазу з різними значеннями $\delta\tau$, що призводить до появи фазового розузгодження. Усереднення за невизначеними або неконтрольованими часовими флуктуаціями дає експоненційне загасання [6, 11] фазових множників:

$$\langle e^{i\omega\delta\tau(t)} \rangle \approx \exp(-\Gamma\tau \cdot t) \quad (3)$$

де $\Gamma\tau$ – ефективна швидкість фазового загасання, що визначається дисперсією часових відхилень. Таким чином, фазове загасання виникає як наслідок порушення часової синхронізації, без необхідності введення фундаментального шуму.

3.2. Зв'язок з матрицею густини.

Для опису декогеренції на рівні спостережуваних величин використаємо формалізм матриці густини. Для чистого стану:

$$\rho(t) = |\psi(t)\rangle\langle\psi(t)| \quad (4)$$

Поza діагональні елементи матриці густини містять фазові множники вигляду:

$$\rho_{ij}(t) \propto e^{i(\varphi_i(t) - \varphi_j(t))} \quad (5)$$



У присутності часових флуктуацій різниця фаз набуває випадкової складової, і після усереднення за ефективними часовими умовами отримуємо:

$$\rho_{ij}(t) = \rho_{ij}(0) \cdot e^{-(\Gamma\tau \cdot t)}, i \neq j \quad (6)$$

При цьому діагональні елементи матриці густини залишаються практично незмінними. Така структура еволюції повністю відповідає стандартному опису чистої декогеренції (phase damping) у теорії відкритих квантових систем.

Отже, порушення часової синхронізації безпосередньо відтворює формальний вигляд фазового загасання, не змінюючи базових постулатів квантової механіки.

3.3. Порівняння з рівняннями типу Ліндблада.

У марковському наближенні динаміка редукованої матриці густини часто описується рівняннями типу Ліндблада [6-8]:

$$d\rho/dt = -i [H, \rho] + \sum_k (L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{ L_k^\dagger L_k, \rho \}) \quad (7)$$

Для чистого фазового загасання відповідні ліндбладівські оператори призводять до експоненційного пригнічення позадіагональних елементів:

$$\rho_{ij}(t) = \rho_{ij}(0) \cdot e^{(-\gamma t)} \quad (8)$$

Порівняння з результатами підрозділу 3.2 показує, що коефіцієнт декогеренції γ може бути інтерпретований як ефективний параметр, що характеризує інтенсивність часових відхилень:

$$\gamma \equiv \Gamma\tau \quad (9)$$

Таким чином, рівняння Ліндблада зберігають свою формальну справедливість, але їхні коефіцієнти отримують фізично змістовну інтерпретацію – як міру порушення глобальної фазової синхронізації, зумовленої неоднорідністю часових умов.

У немарковських режимах ця інтерпретація природно узагальнюється: часові кореляції у $\delta\tau(t)$ призводять до пам'яті в еволюції матриці густини, що узгоджується з відомими узагальненими майстер – рівняннями. Таким чином, темпоральна модель забезпечує єдину інтерпретаційну основу для марковської та немарковської декогеренції.

4. ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ШУМУ ТА ПАМ'ЯТІ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

4.1. Немарковські ефекти як часові кореляції.

У багатьох квантових та інформаційних системах спостерігаються відхилення від марковської динаміки, що проявляються у вигляді ефектів пам'яті та корельованої еволюції станів у часі. У стандартних підходах такі ефекти зазвичай пов'язують зі складною структурою середовища або з наявністю прихованих ступенів свободи, які повільно релаксують.

У межах темпоральної інтерпретації немарковські ефекти можуть бути розглянуті як наслідок часових кореляцій в ефективних часових умовах еволюції системи. Якщо часові відхилення $\delta\tau(t)$ зберігають кореляцію на часових масштабах, порівнянних або більших за характерний час динаміки системи, то фазові зсуви не усереднюються



миттєво. Це призводить до часткового відновлення когерентності або до появи немонотонної еволюції позадіагональних елементів матриці густини.

Таким чином, немарковська динаміка інтерпретується не як виняток з правила, а як природний прояв часово корельованого середовища, у якому відбувається еволюція системи. Цей підхід дозволяє узгодити спостережувані ефекти пам'яті [9, 10] з єдиною фізичною інтерпретацією, не вводячи додаткових стохастичних припущень.

4.2. Повільний дрейф та $1/f$ шум.

Однією з характерних особливостей реальних квантових і інформаційних систем є наявність низькочастотного шуму з характерним спектром типу $1/f$. Такий шум спостерігається в широкому колі фізичних реалізацій [11] – від електронних компонентів до квантових обчислювальних платформ – і часто розглядається як сукупність багатьох повільних випадкових процесів.

У темпоральній інтерпретації $1/f$ -шум природно пов'язується з повільним дрейфом ефективних часових умов. Низькочастотні флуктуації $\delta t(t)$ призводять до накопичення корельованих фазових зсувів, які не компенсуються на коротких часових інтервалах. У результаті фазова стабільність системи поступово знижується, що проявляється як довготривале загасання когерентності.

Перевага такого підходу полягає в тому, що він надає узагальнену фізичну інтерпретацію $1/f$ -шуму без прив'язки до конкретних матеріальних механізмів. Повільний часовий дрейф виступає універсальним джерелом низькочастотних кореляцій, що є релевантним як для квантових систем, так і для складних інформаційних процесів.

4.3. Часово корельовані помилки.

У контексті інформаційних систем та квантових обчислень особливу роль відіграють часово корельовані помилки, які порушують припущення про незалежність шумових процесів. Такі помилки ускладнюють застосування стандартних методів корекції та призводять до зниження ефективності алгоритмів обробки інформації.

З позиції темпоральної інтерпретації часова кореляція помилок є прямим наслідком спільних часових умов, у яких еволюціонують різні компоненти системи. Якщо кілька елементів або каналів обробки інформації [12] зазнають впливу одного й того самого часово корельованого дрейфу, їхні фазові та логічні помилки стають взаємопов'язаними навіть за відсутності прямої взаємодії між ними.

Таке трактування дозволяє розглядати корельовані помилки як структурну властивість часової динаміки системи, а не як сукупність незалежних збоїв. У практичному вимірі це відкриває можливість аналізу стійкості інформаційних систем з урахуванням часових кореляцій, а також формує концептуальну основу для розробки більш адекватних моделей шуму та методів компенсації часових дрейфів.

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1. Переваги запропонованого підходу.

Запропонована темпоральна інтерпретація декогеренції має низку концептуальних і прикладних переваг. Насамперед, вона зберігає повну формальну сумісність зі стандартним апаратом квантової механіки та теорії відкритих систем. Усі результати отримуються без модифікації рівнянь еволюції або введення додаткових динамічних постулатів, що забезпечує коректність і відтворюваність опису.

Важливою перевагою є надання фізично змістовної інтерпретації параметрам декогеренції, які в традиційних моделях мають феноменологічний характер. У межах запропонованого підходу швидкість фазового загасання пов'язується з порушенням



часової синхронізації та часовими кореляціями, що дозволяє об'єднати в єдиній інтерпретаційній схемі марковські, немарковські та корельовані шумові процеси.

Крім того, темпоральна інтерпретація природно пояснює універсальну чутливість квантових і інформаційних систем до повільних збурень та дрейфів параметрів. Це робить її зручною для аналізу реальних систем, у яких домінують низькочастотні шуми та ефекти пам'яті.

5.2. Обмеження та сфера застосування.

Разом із тим запропонований підхід має чітко визначені обмеження. Він не претендує на заміну стандартних середовищних моделей декогеренції або існуючих методів корекції помилок. Темпоральна інтерпретація слугує інтерпретаційним і пояснювальним рівнем опису, який доповнює, але не витісняє усталені формалізми.

Крім того, у межах даної роботи не розглядається питання прямого експериментального керування ефективними часовими умовами. Запропонована модель не є інженерною рецептурою і не передбачає негайного практичного впровадження у вигляді алгоритмів компенсації шуму. Її застосування обмежується аналізом і моделюванням процесів декогеренції, часових кореляцій та фазової нестабільності.

Сфера застосування підходу охоплює насамперед складні квантові та інформаційні системи, у яких стандартні марковські припущення є недостатніми. Це стосується систем із повільними флуктуаціями параметрів, корельованим шумом та вираженими ефектами пам'яті.

5.3. Значення для аналізу складних інформаційних систем.

З позиції аналізу складних інформаційних систем запропонована інтерпретація створює єдину концептуальну основу для опису шуму, пам'яті та корельованих помилок. Розгляд часових збурень як структурного чинника динаміки дозволяє узгодити різноманітні спостережувані ефекти в межах однієї моделі без введення множини незалежних параметрів.

Такий підхід є особливо корисним для систем, що потребують високої часової узгодженості, зокрема розподілених обчислювальних платформ, систем синхронізації, квантових мереж та гібридних інформаційних архітектур. Інтерпретація шуму як прояву порушення часової синхронізації відкриває можливість більш адекватної оцінки стійкості системи до довготривалих збурень та корельованих відмов.

Загалом отримані результати демонструють, що темпоральна інтерпретація декогеренції може слугувати ефективним інструментом концептуального аналізу складних інформаційних процесів, зберігаючи строгість формального апарату та розширюючи можливості інтерпретації спостережуваних явищ.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі запропоновано темпоральну інтерпретацію квантової декогеренції, у межах якої фазове загасання розглядається як наслідок порушення часової синхронізації. Показано, що локальні часові неоднорідності та флуктуації призводять до ефективного пригнічення позадіагональних елементів матриці густини без модифікації стандартного квантового формалізму. Продемонстровано формальну еквівалентність отриманих результатів марковським моделям фазового загасання та рівнянням типу Ліндблада. Обґрунтовано інтерпретацію немарковських ефектів і низькочастотного шуму як проявів часових кореляцій і повільного темпорального дрейфу. Показано, що часово корельовані помилки в інформаційних системах можуть



мати спільне темпоральне походження. Отримані результати розширюють інтерпретаційні можливості аналізу декогеренції та можуть бути використані для дослідження стійкості складних квантових і інформаційних систем.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку часових кореляцій у різних типах квантових та інформаційних систем. Перспективним є розширення запропонованої моделі з урахуванням просторової структури часових неоднорідностей та їх впливу на немарковську динаміку. Окремий інтерес становить застосування темпоральної інтерпретації для аналізу стійкості розподілених інформаційних систем і систем синхронізації в умовах корельованих шумів та повільних дрейфів параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Breuer, H.-P., & Petruccione, F. (2007). *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199213900.001.0001>
2. Busch, P. (2008). The time–energy uncertainty relation. In J. Muga, R. S. Mayato, & Í. Egusquiza (Eds.), *Time in quantum mechanics* (Lecture Notes in Physics, Vol. 734, pp. 73–105). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73473-4_3
3. de Vega, I., & Alonso, D. (2017). Dynamics of non-Markovian open quantum systems. *Reviews of Modern Physics*, 89(1), 015001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015001>
4. Gardiner, C. W., & Zoller, P. (2004). *Quantum noise* (3rd ed.). Springer.
5. Gorini, V., Kossakowski, A., & Sudarshan, E. C. G. (1976). Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *Journal of Mathematical Physics*, 17(5), 821–825. <https://doi.org/10.1063/1.522979>
6. Joos, E., Zeh, H. D., Kiefer, C., Giulini, D., Kupsch, J., & Stamatescu, I.-O. (2003). *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory* (2nd ed.). Springer.
7. Lindblad, G. (1976). On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in Mathematical Physics*, 48(2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/BF01608499>
8. Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
9. Rivas, Á., Huelga, S. F., & Plenio, M. B. (2014). Quantum non-Markovianity: Characterization, quantification and detection. *Reports on Progress in Physics*, 77(9), 094001. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/9/094001>
10. Rovelli, C. (1991). Time in quantum gravity: An hypothesis. *Physical Review D*, 43(2), 442–456. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.43.442>
11. Schlosshauer, M. (2005). Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 76(4), 1267–1305. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.1267>
12. Schlosshauer, M. (2007). *Decoherence and the quantum-to-classical transition*. Springer.
13. Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, 1(1), 69–76. <https://doi.org/10.1007/BF00708656>
14. Zurek, W. H. (1991). Decoherence and the transition from quantum to classical. *Physics Today*, 44(10), 36–44. <https://doi.org/10.1063/1.881293>
15. Zurek, W. H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), 715–775. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.715>

**Andrii Lemeshko**

PhD, Associate Professor

Associate Professor of the Department of Software Engineering and Cybersecurity

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-8003-3168

*a.lemeshko@knu.edu.ua***Viktor Krasnoshchok**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor of the Department of Applied Information Systems

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0002-0967-9131

*krasnoshchokviktor@knu.ua***Alona Desiatko**

PhD, Head of the Department of Software Engineering and Cyber Security

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0003-2860-2188

desyatko@gmail.com

TEMPORAL INTERPRETATION OF QUANTUM DECOHERENCE IN INFORMATION SYSTEMS

Abstract. The article examines the problem of physical interpretation of quantum decoherence, which is traditionally described within phenomenological models of interaction between a quantum system and its environment. It is shown that standard approaches effectively reproduce the dynamics of phase damping but do not provide an explanation of the physical origin of coherence loss. A temporal interpretation of decoherence is proposed, in which phase damping is considered as a consequence of disruption of time synchronization in an inhomogeneous temporal environment. The paper demonstrates that the proposed approach is formally consistent with the density matrix formalism and Lindblad-type equations, reproducing standard exponential decoherence laws. It is substantiated that stochastic and non-Markovian effects can be interpreted as manifestations of temporal correlations and slow temporal drift. The practical value of the research lies in the possibility of applying the proposed interpretation to analyze noise, memory effects, and phase dynamics stability in complex information and quantum systems.

Keywords: quantum decoherence; phase damping; temporal model; time synchronization; density matrix; stochastic perturbations; non-Markovian dynamics; information systems; phase coherence.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Breuer, H.-P., & Petruccione, F. (2007). *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199213900.001.0001>
2. Busch, P. (2008). The time–energy uncertainty relation. In J. Muga, R. S. Mayato, & Í. Egusquiza (Eds.), *Time in quantum mechanics* (Lecture Notes in Physics, Vol. 734, pp. 73–105). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73473-4_3
3. de Vega, I., & Alonso, D. (2017). Dynamics of non-Markovian open quantum systems. *Reviews of Modern Physics*, 89(1), 015001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015001>
4. Gardiner, C. W., & Zoller, P. (2004). *Quantum noise* (3rd ed.). Springer.
5. Gorini, V., Kossakowski, A., & Sudarshan, E. C. G. (1976). Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *Journal of Mathematical Physics*, 17(5), 821–825. <https://doi.org/10.1063/1.522979>
6. Joos, E., Zeh, H. D., Kiefer, C., Giulini, D., Kupsch, J., & Stamatescu, I.-O. (2003). *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory* (2nd ed.). Springer.
7. Lindblad, G. (1976). On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in Mathematical Physics*, 48(2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/BF01608499>



8. Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
9. Rivas, Á., Huelga, S. F., & Plenio, M. B. (2014). Quantum non-Markovianity: Characterization, quantification and detection. *Reports on Progress in Physics*, 77(9), 094001. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/9/094001>
10. Rovelli, C. (1991). Time in quantum gravity: An hypothesis. *Physical Review D*, 43(2), 442–456. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.43.442>
11. Schlosshauer, M. (2005). Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 76(4), 1267–1305. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.1267>
12. Schlosshauer, M. (2007). *Decoherence and the quantum-to-classical transition*. Springer.
13. Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, 1(1), 69–76. <https://doi.org/10.1007/BF00708656>
14. Zurek, W. H. (1991). Decoherence and the transition from quantum to classical. *Physics Today*, 44(10), 36–44. <https://doi.org/10.1063/1.881293>
15. Zurek, W. H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), 715–775. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.715>

Отримано редакцією журналу / Received: 17.01.26

Прорецензовано / Revised: 02.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.03.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.