

ВПЛИВ ГАУССІВСЬКОГО ШУМУ НА ПРИДУШЕННЯ КОГЕРЕНТНОСТІ МЕТОДОМ ПОСЛІДОВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

А.О. Гузенко¹, З.А. Майзеліс^{2,3}

¹ Аспірантка, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАНУ, Харків, Україна

² Старший науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла, доктор фізико-математичних наук, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАНУ, Харків, Україна

³ Професор кафедри теоретичної фізики ім. І.М. Ліфшиця, доктор фізико-математичних наук, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

guzenko.anastasiya@gmail.com

Квантові обчислення є однією з найдинамічніших галузей сучасної науки. Вони відкривають можливість розв'язання задач, недоступних для класичних систем, таких як факторизація великих чисел і моделювання квантових та багаточастинкових процесів [1-3]. Їхня ефективність ґрунтується на збереженні системою когерентності та заплутаності, які забезпечують паралельну обробку інформації.

Однією з головних перешкод у реалізації квантових обчислень є явище декогеренції, що виникає внаслідок взаємодії системи з навколишнім середовищем [4-6]. Основними причинами втрати когерентності є флуктуації зовнішніх параметрів, серед яких найпоширенішими є шумові процеси з різними функціями розподілу і кореляційними властивостями: низькочастотний $1/f$, телеграфний, гауссівський та TLS-пов'язаний шум [7-9]. Гауссівський шум зазвичай використовується для моделювання слабо корельованих випадкових збурень і зумовлює поступове згасання недиагональних елементів матриці густини, що відображає втрату когерентності [10, 11].

Одним зі способів керування еволюцією відкритих квантових систем є послідовні вимірювання. За високої частоти таких вимірювань спостерігається квантовий ефект Зено, коли перехід системи між станами сповільнюється або блокується [9,12]. Дослідження цього ефекту в умовах дії шуму залишається актуальним, оскільки саме шум визначає реалістичну поведінку квантових систем.

Актуальність дослідження визначається потребою у розробці теоретичних підходів, що дозволяють зменшити вплив декогеренції у заплутаних квантових системах, які функціонують у присутності частотного гауссівського шуму. Реалізація квантових обчислень у реальних фізичних умовах неминуче супроводжується шумовими флуктуаціями, що призводять до втрати когерентності й руйнування квантових кореляцій, тому пошук механізмів стабілізації станів є одним із центральних завдань сучасної квантової фізики. Особливий інтерес становить можливість контролю еволюції системи за допомогою послідовних квантових вимірювань, які, за певних умов, здатні пригнічувати дію шуму та сповільнювати декогеренцію. Вивчення взаємодії заплутаної двокубітної системи з гауссівським шумом і перевірка ефективності багаторазових вимірювань як способу збереження когерентності дають змогу глибше зрозуміти механізми керування відкритими квантовими системами та можуть стати основою для розробки більш стійких квантових протоколів у квантових обчисленнях і комунікаціях.

У роботі досліджено динаміку двокубітної квантової системи, що перебуває у заплутаному стані та взаємодіє з термостатом і джерелом частотного шуму. Для опису еволюції розв'язано квантово-кінетичне рівняння Ліндблада з додатковим стохастичним гамільтоніаном, який моделює вплив мультиплікативного гауссівського шуму. Отримано систему рівнянь для часової еволюції матричних елементів матриці густини та виконано усереднення за шумом із використанням характеристичного функціоналу шуму. На основі аналітичних результатів проведено чисельне моделювання, що дало змогу простежити зміну когерентності у часі.

Результати показують, що гауссівський шум спричиняє згасання недиагональних елементів матриці густини, відповідальних за когерентність, і тим самим прискорює втрату квантових кореляцій. Запровадження повторюваних вимірювань із поствідбором у парному базисі дозволяє сповільнити цей процес навіть при скінченній частоті вимірювань. Такий підхід узгоджується з проявами квантового ефекту Зенона і демонструє можливість контролю динаміки відкритих квантових систем.

Отримані результати мають практичне значення для створення стійких квантових протоколів, здатних зберігати когерентність у реалістичних умовах шуму. Розроблена модель може бути використана для побудови схем захисту квантових станів у квантовій криптографії, симуляціях багатокубітних систем і процесах обробки даних. Подальший розвиток цього підходу відкриває можливості для застосування в системах із більш складною структурою шуму та обмеженнями на частоту вимірювань.

Список літератури:

1. *Bernstein, E.*, Quantum complexity theory / *E. Bernstein, U. Vazirani* // Proceedings of the twenty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing. – 1993. – № 93. – С. 11–20. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1145/167088.167097>
2. *Shor, P.* Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring / *P. Shor* // Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – 1994. – С.124-134. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/sfcs.1994.365700>
3. *Coppersmith, D.* An approximate fourier transform useful in quantum factoring / *D. Coppersmith* // – 2002. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0201067>
4. *Landauer, R.* Is quantum mechanics useful? / *R. Landauer* // Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering. – 1995. – № 1703. – С. 367–376. – Режим доступу: <http://www.jstor.org/stable/54534>
5. *Cirac, J. I.*, Quantum computations with cold trapped ions / *J. I. Cirac, P. Zoller* // Physical Review Letters. – 1995. – № 20. – С. 4091–4094. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.4091>
6. *Deshmukh, A.* The role of quantum decoherence in quantum computing systems / *A. Deshmukh* // Journal of Quantum Science and Technology. – 2024. – № 2. – С. 37–43. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.36676/jqst.v1.i2.14>
7. *Paladino, E.*, 1/f noise: implications for solid-state quantum information / *E. Paladino, Y. M. Galperin, G. Falci, B. L. Altshuler* // Reviews of Modern Physics. – 2013. – № 2. – С. 361–418. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1304.7925>
8. *Mutter, P. M.*, Fingerprints of qubit noise in transient cavity transmission / *P. M. Mutter, G. Burkard* // Physical Review Letters. – 2022. – № 23. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.236801>
9. *Cai, W.*, Observation of topological magnon insulator states in a superconducting circuit / *W. Cai, J. Han, F. Mei, Y. Xu, Y. Ma, X. Li* та ін. // Physical Review Letters. – 2019. – № 8. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.123.080501>
10. *Zangi, S. M.*, Decoherence effects in a three-level system under gaussian process / *S. M. Zangi, A. ur Rahman, Z.-X. Ji, H. Ali, H.-G. Zhang* // Symmetry. – 2022. – № 12. – С. 2480.
11. *Jafari, R.*, Dynamics of decoherence in a noisy driven environment / *R. Jafari, A. Asadian, M. Abdi, A. Akbari* // Scientific Reports. – 2025. – № 1.
12. *Nakazato, H.*, Two-Level System with a Noisy Hamiltonian / *H. Nakazato, S. Pascazio* // Journal of Superconductivity. – 1999. – № 6. – С. 843–849.