

## КВАНТОВІ ЕФЕКТИ В РОБОТІ МОЗКУ: МЕХАНІЗМИ, МОДЕЛІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

У роботі досліджено уявлення про можливу роль квантових ефектів у функціонуванні мозку та когнітивних процесах. Проведено аналіз механізмів квантової когерентності, суперпозиції, тунелювання, квантової запутаності та редукції хвильової функції у біологічних системах. Особливу увагу приділено теорії Роджера Пенроуза та Стюарта Гамероффа, згідно з якою мікротрубочки нейронів можуть виступати елементами квантової обробки інформації. Розглянуто фізичні обмеження існування квантових станів у мозку, насамперед проблему декогеренції в теплому та шумному середовищі. Наведено математичний опис основних квантових процесів та здійснено порівняння часових масштабів квантових і нейронних процесів. Також проаналізовано приклади прояву квантових явищ у біології – фотосинтез, магніторецепцію птахів та ферментативний каталіз. Показано, що хоча прямі квантові обчислення в мозку залишаються дискусійними, квантові моделі можуть стати перспективним інструментом для пояснення механізмів свідомості, пам'яті та прийняття рішень.

**Ключові слова:** квантова когерентність, декогеренція, мікротрубочки, мозок, квантова біологія, квантова запутаність, тунелювання, свідомість.

### Abstract

The paper examines the concept of the possible role of quantum effects in brain function and cognitive processes. An analysis of the mechanisms of quantum coherence, superposition, tunneling, quantum entanglement, and wave function collapse in biological systems is conducted. Special attention is given to the theory of Roger Penrose and Stuart Hameroff, according to which neuronal microtubules may act as elements of quantum information processing. The physical limitations of the existence of quantum states in the brain are considered, primarily the problem of decoherence in a warm and noisy environment. A mathematical description of the main quantum processes is provided, and a comparison of the time scales of quantum and neuronal processes is made. Examples of quantum phenomena in biology are also analyzed – photosynthesis, bird magnetoreception, and enzymatic catalysis. It has been shown that although direct quantum computations in the brain remain controversial, quantum models may become a promising tool for explaining the mechanisms of consciousness, memory, and decision-making.

**Keywords:** quantum coherence, decoherence, microtubules, brain, quantum biology, quantum entanglement, tunneling, consciousness.

Проблема природи свідомості та механізмів функціонування мозку є однією з найскладніших у сучасній науці. Незважаючи на значні успіхи нейробиології, фізики та когнітивних наук, досі не існує єдиної теорії, яка б повністю пояснювала процеси мислення, пам'яті, формування свідомості та прийняття рішень. Традиційні моделі мозку базуються на електрохімічній активності нейронів, передачі сигналів через синапси та складній мережевій взаємодії клітин. Однак, деякі дослідники припускають, що класичних механізмів недостатньо для пояснення складності людської свідомості.

У зв'язку з цим, останніми роками активно розвивається напрям квантової біології та квантових моделей мозку. Основна ідея полягає у тому, що такі явища квантової механіки, як суперпозиція, запутаність, тунелювання або когерентність, можуть брати участь у когнітивних процесах.

Квантова механіка описує поведінку мікрочастинок і є фундаментальною теорією сучасної фізики. На відмінну від класичної фізики, вона допускає існування систем у кількох станах одночасно. Стан квантової системи описується хвильовою функцією:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – комплексні амплітуди ймовірностей.

Одним із фундаментальних понять квантової механіки є квантова когерентність – здатність системи зберігати фазові співвідношення між різними станами суперпозиції. Саме когерентність забезпечує виникнення інтерференційних ефектів та роботу квантових комп'ютерів.

Однак, будь-яка взаємодія із зовнішнім середовищем призводить до когерентності – руйнування квантового стану. Процес декогерентності описується через матрицю щільності:

$$\rho_S(t) = \text{Tr}_E[U(t)(\rho_S \otimes \rho_E)U^\dagger(t)], \text{ де}$$

- $\rho_S$  — матриця щільності системи,
- $\rho_E$  — матриця щільності середовища,
- $U(t)$  — еволюційний оператор,
- $\text{Tr}_E$  – усереднення за станами середовища.

Мозок людини є теплим, вологим і шумовим середовищем із великою кількістю молекул води та теплових флуктуацій. Через це квантові стани руйнуються надзвичайно швидко. За оцінками макса Tegmark, час когерентності в нейронних структурах може становити:

$$\tau_D \approx 10^{-13} - 10^{-20} \text{ с}$$

Тоді як типовий час генерації потенціалу дії нейрона становить:

$$t_{neuron} \approx 10^{-3} \text{ с}$$

Отже, квантові стани руйнуються набагато швидше, ніж відбуваються класичні нейронні процеси, що є одним із головних аргументів критиків квантових моделей мозку.

Попри проблему декогерентності, у природі вже виявлено низку біологічних процесів, у яких квантові ефекти відіграють важливу роль.

У фотосинтетичних комплексах рослин і бактерій енергія переноситься з надзвичайно високою ефективністю. Дослідження FMO-комплексу показали, що перенесення енергії може відбуватися когерентно, коли екситон одночасно «досліджує» кілька можливих шляхів.

Енергія фотона визначається співвідношенням Планка:

$$E = h\nu$$

Когерентність у таких системах зберігається протягом сотень фемтосекунд, що є значним досягненням для біологічних структур.

Багато перелітних птахів здатні орієнтуватися за магнітним полем Землі. Однією з основних гіпотез є механізм криптохромів, у яких можуть утворюватися заплутані радикальні пари електронів.

Ймовірність квантового переходу описується співвідношенням:

$$P = |\langle \phi | \psi \rangle|^2$$

У деяких ферментативних реакціях електрони або протони можуть проходити крізь енергетичних бар'єр завдяки тунелюванню, що прискорює біохімічні процеси.

Ймовірність тунелювання визначається виразом:

$$T \approx e^{-2\gamma a}, \text{ де}$$

- $a$  – ширина бар'єра;
- $\gamma$  – параметр, що залежить від енергії частинки та висоти бар'єра.

Ці приклади демонструють, що квантові явища можуть існувати в живих системах навіть за умов кімнатної температури.

Одним із найбільш цікавих явищ квантової механіки є квантова заплутаність. Дві або більше частинок можуть перебувати у суспільному квантовому стані так, що вимірювання однієї миттєво впливає на іншу незалежно від відстані між ними.

Заплутаний стан двох кубітів описується так:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

У межах квантових моделей мозку припускається, що подібні стани можуть виникати між молекулами або структурами нейронів. Якщо такі механізми існують, мозок потенційно міг би здійснювати паралельну обробку великої кількості інформації.

Заплутаність теоретично може пояснювати:

- швидке асоціативне мислення;
- синхронізацію активності ділянок мозку;
- інтеграцію сенсорної інформації;
- цілісність свідомого прийняття

Проте, експериментальних підтверджень існування довготривалих заплутаних станів у мозку поки не отримано.

Однією із найвідоміших квантових моделей свідомості є теорія Роджера Пенроуза та Стюарта Гамероффа (Orchestrated Objective Reduction).

Відповідно до цієї теорії:

- мікротрубочки нейронів можуть підтримувати квантові стани;
- свідомість виникає внаслідок редукції хвильової функції;
- квантові процеси в мозку можуть бути пов'язані з квантовою гравітацією.

Мікротрубочки – це білкові структури цитоскелета клітини, утворені з тубуліну. Вони мають впорядковану структуру та діаметр приблизно 25 нм. Теоретично кожен діаметр тубуліну може перебувати у двох конфігураційних станах:

$$|\psi\rangle = c_1|A\rangle + c_2|B\rangle, \text{ де}$$

- $|A\rangle$  і  $|B\rangle$  – два можливі стани білка;
- $c_1$  і  $c_2$  – амплітуди ймовірностей.

Гравітаційна редукція Пенроуза оцінюється через співвідношення:

$$\tau = \frac{\hbar}{E_G}, \text{ де}$$

- $\hbar$  – зведена стала Планка;
- $E_G$  - гравітаційна енергія розділення станів.

На думку авторів теорії, саме момент редукції хвильової функції породжує елементарний акт свідомості.

Роджер Пенроуз вважав, що людське мислення не може бути повністю алгоритмічним. Він спирався на теорему Геделя про неповноту, згідно з якими існують істинні твердження, які неможливо довести в межах певної формальної системи.

Пенроуз припускав, що свідомість може використовувати неалгоритмічні квантові процеси. Ймовірність знаходження частинки у певному стані задається:

$$P(x) = |\psi(x)|^2$$

У його моделі колапс хвильової функції пов'язаний із нестабільністю простору-часу на квантовому рівні, а свідомість може бути фундаментальною фізичною властивістю Всесвіту.

Окремим напрямком є квантова когнітивна психологія, у якій квантова механіка використовується як математичний апарат для опису мислення та прийняття рішень.

Дослідження показують, що людська поведінка часто не відповідає класичній теорії ймовірностей. Наприклад:

- Ефект порядку запитань;
- Контекстна залежність рішень;

- Когнітивні парадокси;
- Неоднозначність вибору.

У квантових когнітивних моделях стан думки описується вектором у гільбертовому просторі, а ймовірність вибору визначається правилом Борна:

$$P_{(\text{вибір})} = |\langle \text{стан} | \psi \rangle|^2$$

Такі моделі дозволяють описувати поведінку людини точніше, ніж деякі класичні статистичні підходи.

Квантові комп'ютери працюють на основі кубітів – квантових бітів, які можуть перебувати одночасно у двох станах:

$$|q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Завдяки суперпозиції квантові комп'ютери здатні виконувати величезну кількість операцій паралельно.

Мозок людини також характеризується ісоким рівнем паралелізму:

- близько  $10^{11}$  нейронів;
- приблизно  $10^{15}$  синапсів;
- мільярди сигналів щосекнди.

Деякі дослідники вважають, що принципи роботи мозку можуть надихнути створення нових типів квантових обчислювальних систем.

Температура є одним із головних факторів, що впливають на стабільність квантових станів. Більшість сучасних квантових комп'ютерів працюють за температур, близьких до абсолютного нуля:

$$T \approx 10^{-3} \text{ K}$$

Натомість, температура людського мозку становить:

$$T_{\text{brain}} \approx 310 \text{ K}$$

За таких умов теплові коливання дуже швидко руйнують когерентність, що є серйозною проблемою для квантових моделей мозку.

Попри привабливість квантових теорій свідомості, існує низка суттєвих проблем:

1. Декогеренція – квантові стани руйнуються надзвичайно швидко.
2. Відсутність експериментального підтвердження – на даний момент не існує прямих доказів квантових обчислень у мозку.
3. Складність біологічного середовища – мозок є відкритою системою з великою кількістю взаємодій.
4. Проблема масштабування – квантові ефекти зазвичай проявляються на рівні атомів і молекул.
5. Альтернативні пояснення – більшість когнітивних процесів успішно описуються класичною нейронаукою.

Якщо квантові процеси в мозку будуть підтверджені експериментально, це може призвести до революційних змін у фізиці, нейронауці та інформаційних технологіях.

Квантові ефекти в роботі мозку залишаються однією з найбільш дискусійних тем сучасної науки. Хоча класична нейробіологія успішно пояснює більшість нейронних процесів, деякі аспекти свідомості та когнітивної діяльності все ще потребують глибшого розуміння.

Дослідження квантової когерентності, тунелювання, суперпозиції та заплутаності у біологічних системах демонструють, що природа здатна використовувати квантові механізми навіть у теплому середовищі. Це відкриває можливість існування подібних процесів і в мозку, хоча наразі прямих доказів недостатньо.

Теорія Orchestrated Objective Reduction та інші квантові моделі є важливими спробами об'єднати фізику, нейробіологію та теорію свідомості. Навіть якщо квантові ефекти не є основою мислення,

математичні підходи квантової механіки вже демонструють ефективність у моделюванні когнітивних процесів.

Подальший розвиток квантової біології, нейрофізики та нанотехнологій може суттєво змінити сучасне уявлення про роботу мозку та природу людської свідомості.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shadows of the Mind / Penrose R. *Shadows of the Mind*. Oxford University Press, 1994.
2. Hameroff S., Penrose R. *Consciousness in the universe: Orch OR theory*. Physics of Life Reviews, 2014.
3. Tegmark M. *Importance of quantum decoherence in brain processes*. Physical Review E, 2000.
4. Bandyopadhyay A. *Evidence of coherent quantum states in microtubules*. Journal of Physics, 2017.
5. Fisher M. *Quantum cognition: possibility of nuclear spin entanglement in the brain*. Annals of Physics, 2015.
6. Lambert N. et al. *Quantum biology*. Nature Physics, 2013.
7. McFadden J., Al-Khalili J. *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*. Bantam Press, 2014.
8. Schrödinger E. *What is Life?* Cambridge University Press, 1944.
9. Davies P. *The Demon in the Machine*. University of Chicago Press, 2019.
10. Arndt M., Juffmann T., Vedral V. *Quantum physics meets biology*. HFSP Journal, 2009.

**Михалевич Марія Олександрівна** – студентка групи 4КН-256, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [mariamihalevic394@gmail.com](mailto:mariamihalevic394@gmail.com)

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Mykhalevych Mariia Oleksandrivna** - student of group 4KS-25b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [mariamihalevic394@gmail.com](mailto:mariamihalevic394@gmail.com)

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.**— Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of general Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia