

Костянтин ДЯДЮРА, д-р техн. наук, проф.,  
Альона КИСИЛЕВСЬКА, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,  
Ігор ПРОКОПОВИЧ, д-р техн. наук, проф.,  
Аліна ГАЛАНЗОВСЬКА, студент,  
Сергій ЯБАНЖИ, аспірант  
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, e-mail: dyadyura.k.o@op.edu.ua

## ПЕРЕХОДИ МІЖ ПАТТЕРНАМИ ПОВОДЖЕННЯ В БІОЛОГІЇ. ПРИКЛАД: РУХИ РУК

**Анотація.** Висока координація м'язів і нейронів проявляється у специфічних режимах макроскопічного руху, що описується одним керуючим параметром. Саме з наявністю одного-єдиного керуючого параметра пов'язана дуже мала кількість інформації – мале в порівнянні з інформацією, необхідною для опису окремо стану всіх нейронів та м'язів. Було показано, що принцип максимуму інформаційної ентропії дає змогу знаходити адекватний параметр порядку та навіть відповідне рівняння. Можна сподіватися, що складніші патерни поведінки можуть бути описані за допомогою невеликого числа параметрів порядку.

**Ключові слова:** самоорганізація, реабілітація, мимовільні осциляторні рухи, флуктуації, керуючий параметр.

### Актуальність дослідження

У біології пояснення високої координації м'язів часто вдаються до ідеї «моторної програми». Відповідно до цієї ідеї після звернення до цієї програми нейрон починає керувати окремими рухами. При такому поясненні важко зрозуміти, чому взагалі мають виникати флуктуації: моторна програма цілком детермінована і не допускає жодних флуктуацій. Разом з тим критичні флуктуації вельми характерні для нерівноважних фазових переходів, які у тому випадку, коли має місце самоорганізація. Саме тому ми вважаємо, що виявлені в таких експериментах флуктуації істотно підкріплюють уявлення про м'язи і нейрони як про елементи, що утворюють систему, що самоорганізується (аналогічну лазеру, в якому при зміні одного керуючого параметра можуть відбуватися переходи між режимами різного типу). Однак експерименти, про які йдеться, не дозволяють відповісти на питання про те, чи відбувається самоорганізація у всій системі «м'язи та нейрони» або лише в нейронній підсистемі.

### Мета дослідження

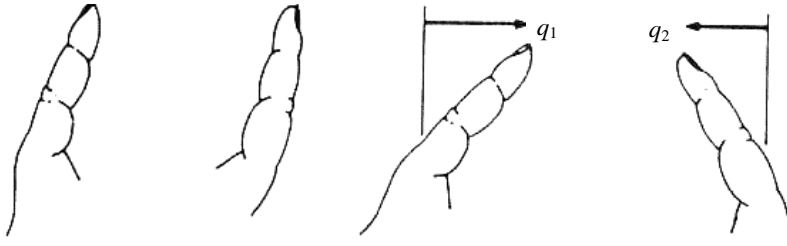
Метою даного дослідження є моделювання складних процесів, що відбуваються в нервових клітинах, якими зумовлені переходи у фазах активності.

### Основні матеріали досліджень

Як відомо [1, 2] з численних прикладів з галузі фізики та хімії, системи, що самоорганізуються, можуть породжувати деякі характерні тимчасові структури. Певні структури, або патерни, можуть спостерігатися і в поведінці біологічних систем, наприклад, можуть виникати характерні режими вказівних пальців. Під час дослідження мимовільних осциляторних рухів двох вказівних пальців Келсо виявив цікаве явище [3]. За командою збільшити частоту протифазних антисиметричних рухів вказівних пальців (активність розгиначів одного пальця поєднується з активністю згиначів іншого пальця) у піддослідного суб'єкта раптово відбувся перехід до синфазного симетричного руху обох пальців (одночасної активності гомологічних груп м'язів) (рис. 1, 2, 3).

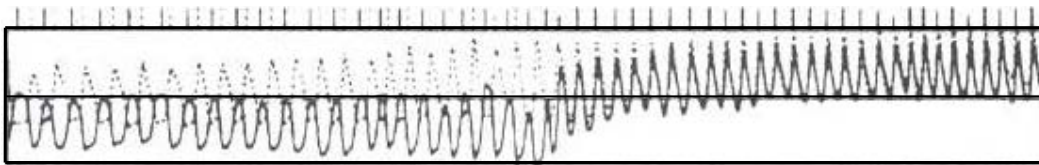
Хоча в різних суб'єктів цей фазовий перехід відбувався при, частотах, які сильно відрізняються, саме явище було цілком передбачувано. Якщо ж частоту переходів вимірювати в одиницях переважної частоти (тобто ввести для кожного суб'єкта незалежну міру частоти рухів, при якій він (або вона) готовий здійснювати циклічно повторювані рухи «хоч цілий день»), то безрозмірне

ставлення, що виходить, або «критичне значення», виявлялося однаковим у всіх піддослідних суб'єктів. Введення опору тертя руху супроводжувалося систематичною зміною кращої частоти і частоти переходу кожному суб'єкта, але змінювало критичного значення всім суб'єктів.

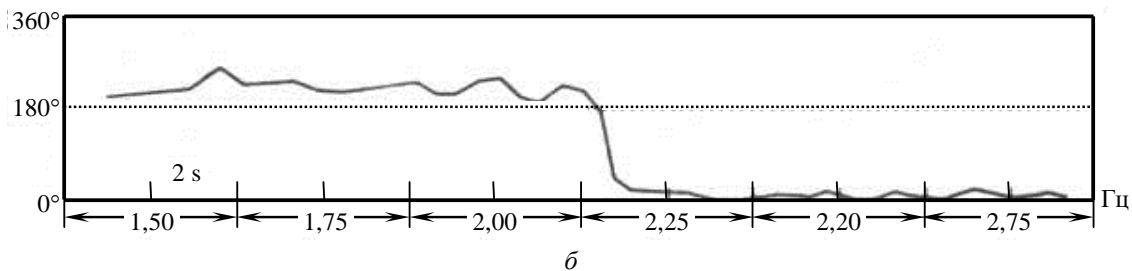


**Рис. 1.** Мимовільний перехід від паралельного руху пальців (ліворуч) до антипаралельного симетричного руху (праворуч)

Піки руху однієї руки утворюють масив даних, які підлягають обробці. Для кожного піку обчислюємо його зсув фазою відносно періоду від піку до піку іншого масиву. Побудований графік повторює фазову криву, у ньому виразно видно і відставання, і випередження по фазі.



**Рис. 2.** Часові ряди: рух у часі лівої (суцільна лінія) та правої (пунктирна лінія) рук, суб'єкт за командою експериментатора просто збільшує циклічну частоту антисиметричної моді



**Рис. 3.** Оцінка зсувів по фазі для піків руху однією рукою: неузгодженість фази між двома руками

### Результати

Позначимо  $q_1$  та  $q_2$ , як показано на рис. 1, переміщення кінців пальців. Тоді:

$$\begin{aligned} q_1 &= r_1 \cdot \cos(\omega t + \varphi_1); \\ q_2 &= r_2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (1)$$

де  $r_1$  та  $r_2$  – амплітуди, які, як показують експериментальні дані, можна вважати не залежними від часу, але залежать від частоти  $\omega$ , з якою повинні рухатися пальці.

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – фази функції часу, що повільно змінюються.

Надалі ми будемо припускати, що

$$\begin{aligned} r_1 &= r_2 = r; \\ \varphi_1 &= \varphi_2 = \varphi. \end{aligned}$$

Тепер вже нескладно застосувати принцип максимуму інформаційної ентропії та отримати функцію розподілу  $P$  наступного виду

$$P(\varphi) = \exp[-\lambda - \lambda_1 \cdot \cos \varphi - \lambda_2 \cdot \cos(2\varphi)]. \quad (2)$$

Множники Лагранжа  $\lambda$ ,  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  залежать від  $\omega$  не тільки тому, що від  $\omega$  залежать множники  $r^2$  та  $r^4$ , що стоять перед середніми значеннями. Як свідчать експерименти, середні значення також залежить від  $\omega$ . Експоненту, що входить у співвідношення (2), можна записати за допомогою потенціалу:

$$\hat{V}(\varphi) = \lambda_1 \cdot \cos \varphi + \lambda_2 \cdot \cos(2\varphi). \quad (3)$$

Цей потенціал визначає стійкі та нестабільні стани системи. Існує локальний мінімум, який рекомендує паралельному руху вказівних пальців. Коли параметр  $\lambda_2/\lambda_1$  зменшується, цей мінімум стає більш плоским і врешті-решт зникає зовсім, що відповідає антипаралельному (або інакше кажучи, симетричному) руху пальців, про який ми згадували вище. Єдине припущення полягає в тому, що відношення  $\lambda_2/\lambda_1$  залежить від частоти  $\omega$ , яка змушує. Але на цьому можливості нашої моделі далеко ще не вичерпуються. Розглянемо випадок, коли примушуюча частота настільки велика, що реалізується лише стан із симетричним рухом пальців. В даному випадку залишається стан  $\varphi = 0$ .

Цей стан, при якому підослідний суб'єкт, продовжуватиме симетрично рухати вказівними пальцями і після того, як частота зменшиться і стане нижчою за критичну. Це теоретичне передбачення було перевірено Келсом і підтвердилося.

Особливість цих простих експериментів полягає в раптовій і зовсім мимовільній зміні впорядкування, або фазування, активності м'язових груп при певній критичній частоті, що визначається індивідуальними особливостями суб'єкта. Зміни у координації рухів можуть бути спричинені змінами одного параметра, процесу, що відбуваються в нервових клітинах, якими зумовлені переходи у фазах моторної активності, поки що мало зрозумілі.

### **Висновки**

Таким чином можна стверджувати, що основні особливості описаних вище експериментів зводяться до наступних:

- наявності лише двох стійких фазових станів («атракторів») у рухах рук (яка саме фаза спостерігається, залежить від того, як підготовлена система, тобто від команди рухати кистями чи вказівними пальцями синфазно чи у протифазі);
- різкого переходу з одного стану атрактора в інший за деякої критичної частоти циклічних рухів;
- існування в закритій області (при частоті вище критичної) лише однієї моди (симетричних синфазних рухів);
- збереження симетричної моди при зниженні циклічної частоти (інакше кажучи, при зменшенні частоти система не повертається в спочатку підготовлений стан, що свідчить про існування областей тяжіння симетричної та антисиметричної мод та придушення однієї з них).

### **Література**

1. Brenner, J.E., Igamberdiev, A.U. (2021). Structures and Complex Systems. In: Philosophy in Reality. Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics, vol 60. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62757-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62757-7_16).
2. Ouazan-Reboul, V., Agudo-Canalejo, J. & Golestanian, R. (2023) Self-organization of primitive metabolic cycles due to non-reciprocal interactions. *Nat Commun*, 14, 4496. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40241-w>
3. Abrahamson, D., Mechsner, F. (2022) Toward Synergizing Educational Research and Movement Sciences: a Dialogue on Learning as Developing Perception for Action. *Educ Psychol Rev*. 34, 1813–1842. <https://doi.org/10.1007/s10648-022-09668-3>.