

**М.М. ГЛИБОВЕЦЬ**

Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна,  
email: [glib@ukma.edu.ua](mailto:glib@ukma.edu.ua).

**С.О. МЕДВІДЬ**

Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна,  
email: [s.medvid@ukma.edu.ua](mailto:s.medvid@ukma.edu.ua).

## **ПІДХІД MorphoNAS: ЕМБРІОГЕННИЙ ПОШУК НЕЙРОННИХ АРХІТЕКТУР ЧЕРЕЗ МОРФОГЕН-КЕРОВАННИЙ РОЗВИТОК**

**Анотація.** Запропоновано новий підхід MorphoNAS для детермінованого вирощування нейронних мереж через морфоген-керовану самоорганізацію на основі принципу вільної енергії, реакційно-дифузійних систем та генних регуляторних мереж. Досліджено модель розвитку, в якій компактні геноми кодують лише динаміку морфогенів та порогові правила клітинного розвитку, що забезпечує трансформацію єдиної клітини-попередника у складні нейронні архітектури. Досягнуто повного успіху (100 %) еволюційного пошуку геномів, що генерують задані конфігурації графів із 8–31 вершинами. Отримано мінімальні функціональні контролери (6–7 нейронів) для задачі CartPole у разі застосування тиску на мінімізацію розміру мережі з успішністю пошуку 94 %. Продемонстровано, що біологічно правдоподібні правила розвитку можуть слугувати ефективним механізмом автоматизованого пошуку нейронних архітектур.

**Ключові слова:** MorphoNAS, морфогенез, пошук нейронних архітектур, реакційно-дифузійні системи, генетичні регуляторні мережі, еволюційні алгоритми.

### **ВСТУП**

Біологічний мозок не вибудовується ділянка за ділянкою, він проходить стадії розвитку на основі компактної генетичної програми, що в результаті вирощує цілісну нейронну систему. У своїй гіпотезі геномного вузького місця Т. Задор [1] припускає, що, судячи з усього, геном ніяк не може кодувати повну діаграму мозку. Він, швидше, кодує стиснений кластер інструкцій розвитку — правил, обмежень та умов їхнього застосування. Це породжує архітектури, які набагато більш ефективні і гнучкі, та при цьому більш адаптовані, ніж найкращі сучасні штучні системи. До того ж Т. Задор стверджує [1], що спільно-та дослідників машинного навчання давно відійшла від початкових біологічних принципів. Він наводить приклад, в якому зазначає, що мозок молоді тварини може ефективно навчатися без використання значної кількості позначених прикладів (способу, який застосовують як у контрольованому, так і в неконтрольованому машинному навчанні). Автор також наголошує на іншому потенційно важливому наслідку геномного вузького місця: цей феномен вказує шлях до нейронних мереж, здатних до швидкого навчання після завершення етапу розвитку [1].

Принцип вільної енергії (free energy principle, FEP), запропонований К. Фрістоном [2], надає теоретичне підґрунтя ідеї Задора про те, що кожна жива система — від клітини до мозку — прагне мінімізувати варіаційну вільну енергію. Це зумовлює емерджентну самоорганізацію в передбачувані, низькоентропійні стани через сприйняття (виведення, inference) та дію (розвиток чи адаптацію). У контексті морфогенезу [3] FEP зумовлює формування ембріонних структур на основі локальних взаємодій, тобто динаміки морфогенів, та генетичних регуляторних мереж (ГРМ) [4, 5].

Поєднання цих принципів у еволюційній обчислювальній системі дає змогу еволюціонувати нейронні архітектури не через маніпулювання явними графами, а як ембріогенні фенотипи, що керуються компактним геномом, який кодує мор-