ВІДГУК
на дисертаційну роботу ***Щур Ольги Володимирівни***
**«Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків»**,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
104 Фізика та астрономія

**Актуальність теми дисертації**. Дисертаційна робота Щур О. В. стосується модельного опису одного з основних питань в дослідженні мозку, а саме процесів мислення. Частиною цього питання є проблема нейронного кодування у контексті з'ясування механізмів, що лежать у його основі, а також переробки інформації/сигналів у реальних нейронних мережах. Нейрони генерують стереотипні електричні імпульси, що називаються спайками. Вважається, що інформація у нервовій системі передається не формою таких електричних імпульсів, а їхнім розташуванням в часі. Нейронна активність є випадковою, тому математично її можна описувати як точковий стохастичний процес. Результатів такого опису нейронної активності точковими стохастичними процесами досі було отримано небагато, що пояснюється складністю такого математичного підходу. Для опису перетворення сигналів в окремому нейроні вважається, що на його вхід подається випадкова послідовність імпульсів, яка є реалізацією певного точкового процесу. Нейрон перетворює її в іншу випадкову послідовність імпульсів, для якої ставиться задача з'ясувати статистику часових інтервалів між послідовно розташованими у цій послідовності імпульсами. Якщо розподіл міжспайкових інтервалів (МСІ) є експоненційним та окремі МСІ є незалежними, це означає, що точковий процес, який описує генерацію спайків, є пуассонівським, а отже, процесом без пам'яті та без будь-якої часової структури. Для процесу Пуассона інтенсивність процесу не залежить від попередніх подій та є сталою. Точковий процес Пуассона часто використовується як модель нейронної активності. Тому актуальною є задача перевірки обґрунтованості такого припущення для стандартних нейронних моделей.

Нещодавні експериментальні дослідження виявили поширеність у головному мозку та важливість для його функціонування нейронів з аутапсами. Такі нейрони мають зв'язки не лише з іншими нейронами, а й з самими собою. Іншими словами, має місце затриманий зворотний зв'язок, який може бути збуджувальним або гальмівним в залежності від типу нейрону. Тому є актуальним дослідження впливу наявності затриманого зворотного зв'язку на статистику активності імпульсних нейронів.

Ще одним важливим питанням нейронного кодування є стиснення інформації. Раніше було запропоновано можливий фізичний механізм стиснення інформації як прямування різних динамічних траєкторій системи, зв'язаних між собою нейронів до одного з аттракторів цієї системи. Важливо, що час проходження імпульсу між двома нейронами системи є скінченним, тому у такій системі наявний затриманий зворотний зв'язок. У зв'язку з вище зазначеним, актуальним завданням є з'ясування фізичного механізму прямування різних динамічних станів нейронної мережі до одного з аттракторів.

**Наукова новизна отриманих автором результатів** полягає в наступному:
- Для моделі інтегруючого нейрона з втратами з порогом двійка одержано вичерпний опис статистики довжин вихідних міжімпульсних інтервалів в термінах твірної функції моментів, яку знайдено явно.
- Для моделі зв'язуючого нейрона з порогом 2, у випадку стимуляції загальним точковим процесом відновлення, знайдено перетворення Лапласа функції розподілу вихідних міжспайкових інтервалів. Для конкретного прикладу стимуляції у вигляді процесу Ерланга знайдено явний вигляд функції розподілу вихідних міжспайкових інтервалів.
- Було досліджено як лінія затриманого зворотного зв'язку впливає на статистику активності імпульсних нейронів. Зокрема:

1. Доведено, що за стимуляції нейрона з гальмівним або збуджувальним затриманим зворотним зв'язком будь-яким точковим процесом відновлення, у тому числі процесом Пуассона, його стохастична активність виходитиме на стаціонарний режим. Було знайдено умову існування та єдиності такого стаціонарного режиму, а також явні формули для обчислення його характеристик.

2. Для класу нейронних моделей, що стимулюються точковим процесом Пуассона отримано зв'язок між функцією розподілу вихідних МСІ для нейрону з затриманим гальмівним, або збуджувальним зворотним зв'язком та відповідною функцією розподілу для такого ж нейрона, але без зворотного зв'язку. Також було знайдено зв'язок між моментами функції розподілу вихідних МСІ для нейрону з зворотним зв'язком та моментами відповідної функції розподілу для такого ж нейрона, але без зворотного зв'язку.

3. Результат п.2 було розширено для гальмівного нейрона на випадок, коли стимулом є загальний процес відновлення. Результат проілюстровано на прикладі стимуляції процесом Ерланга.

- Було досліджено динаміку імпульсної нейронної мережі, що викликана певним початковим стимулом. Було з’ясовано яким є фізичний механізм процесу прямування різних динамічних траєкторій, викликаних різними початковими стимулами, до стаціонарного стану.

**Практичне значення одержаних результатів**. Робота має теоретичний характер з досить вагомою часткою комп’ютерного моделювання, проте отримані у дисертації результати можуть бути використані при аналізі експериментально виміряних розподілів МСІ щоб з'ясувати, чи має досліджуваний нейрон аутапси.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.** Дисертаційна робота відповідає вимогам до досліджень такого рівня. Роботу виконано на належному науковому рівні. Достатньо високий рівень обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих в дисертації, їх достовірність забезпечені строгістю і коректністю математичних постановок задач. Особливо слід відзначити виняткову чіткість та детальність опису «мікроскопіки» тих чи інших елементарних процесів у ланцюжку подій «стимуляція-проходження імпульсом зворотного зв’язку – генерація спайку» на мові перехідних ймовірностей та представлення її впливу на «макроскопічні» характеристики системи у вигляді статистики міжспайкових інтервалів. Висновки по роботі є чіткими, логічними та випливають із теоретичних даних та результатів комп’ютерного моделювання, отриманих автором.

**Повнота викладу в наукових публікаціях.** Результати наукових досліджень, отриманих у дисертації, опубліковано у 4 журнальних публікаціях та 1 препринті, що є достатнім для дисертаційної роботи доктора філософії.

**Виявлені недоліки та зауваження до роботи:**

1. У роботі отримано вирази для стаціонарного режиму стохастичної активності нейронів та проаналізовано умову його існування та єдиності. Цікаво було б також оцінити часи виходу системи на такий режим.
2. На рисунках у розділах 2-4 наводяться дані, не пов'язані з певною моделлю нейрона. При цьому вони порівнюються з комп'ютерним експериментом для конкретної нейронної моделі. Спостерігається майже ідеальна відповідність результатів моделювання Монте-Карло (МК) тим чи іншим теоретичним підходам, де в якості параметрів опису фігурують лише характеристики процесу стимуляції та властивості зворотного зв'язку. Як можна пов'язати ці два факти, тим більше пояснити ідеальне відтворення результатів теоретичного підходу для загального класу нейронних моделей з порогом 2 і моделювання МК з цілком визначеними параметрами нейрона?
3. Точний опис статистики MCI для загального класу нейронних моделей справедливий лише у певному часовому інтервалі. Натомість, вибрана модель нейрона уможливлює такий розрахунок для всіх часів спостереження. Хотілось би мати чітке визначення часових проміжків, на яких все ще можливий опис MCI на мові загального класу нейронних моделей, і коли він вже перестає спрацьовувати та стає необхідним залучати до розгляду ту чи іншу (вибрану) модель нейрона.
4. У роботі розглядається ціла низка як нейронних моделей, так і процесів, що стимулюють появу спайків. Тим не менше, відчувається певна нестача порівнянь для одних і тих же обчислюваних характеристик в залежності від моделі нейронів та/або властивостей процесів відновлення. Це не дозволяє потенційним читачам зробити ефективний якісний та кількісний порівняльний аналіз отриманих результатів та розмиває загалом дуже позитивне враження від дисертаційної роботи.
5. Останній розділ роботи переобтяжений занадто детальною і часом нерелевантною інформацією на кшталт згадок про таблиці Oracle Berkeley Database чи навіть фрагментів кодів. З іншого боку, не вистачає чітких дефініцій, напр., що означає термін «реверберативна динаміка нейронної мережі», чи що собою являє та чи інша траєкторія. Очевидно, що мова не йде про фазові траєкторії, оскільки досліджуються дискретні процеси за аналогією з комірковими автоматами. Тому термін «траєкторія» застосовується для певного набору чисел, що характеризують стани нейронів та/або аксонів. Добре було б внести додаткову чіткість у це питання, щоб уникнути можливих двозначностей у сприйнятті отриманих результатів.

Не зважаючи на зроблені зауваження, слід відзначити, що вони не зменшують наукової цінності роботи та достовірності отриманих практичних результатів. Деякі з них можна вважати рекомендаціями щодо можливих подальших досліджень; інші стосуються ефективності представлення результатів у розрізі їх сприйняття читачами. Усі п'ять згаданих пунктів жодною мірою не зменшують позитивне враження від дисертаційної роботи.

**Висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам:**

1. Тема дисертаційного дослідження, основні теоретичні положення, що виносяться на захист, дозволяють зробити висновок про відповідність дисертаційної роботи Щур Ольги Володимирівни «Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків» спеціальності 104 «Фізика та астрономія».
2. Дисертаційна робота Щур О. В. є завершеною науковою працею, виконаною автором самостійно, містить нові науково-обґрунтовані результати.
3. Основні результати дисертації з вичерпною повнотою викладені в 4 опублікованих наукових працях автора, пройшли широку апробацію на конференціях різного рівня.
4. Матеріал, що наведений в дисертації, за актуальністю, науковою новизною, об'ємом і глибиною теоретичних досліджень задовольняє вимогам до дисертацій ступеня доктора філософії згідно положень постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44

“Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, а здобувач Щур Ольга Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

**Опонент**
старший науковий співробітник
відділу комп'ютерного моделювання багаточастинкових систем
Інституту фізики конденсованих систем
Національної академії наук України,
кандидат фіз.-мат. наук В. В. Ігнатюк