



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України
академік НАН України
Анатолій ЗАГОРОДНІЙ
11 серпня 2022 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 1 від 11 серпня 2022 р. засідання
відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

СЛУХАЛИ: аспіранта відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України Щур Ольгу Володимирівну за матеріалами дисертаційної роботи „Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

ПРИСУТНІ: керівник семінару – заступник директора з наукової роботи, доктор фіз.-мат. наук В. І. Засенко; доктор фіз.-мат. наук О. М. Васильєв; доктор фіз.-мат. наук О. К. Відибіда; доктор фіз.-мат. наук М. С. Гончар; доктор наук з галузі "Природничі науки" А. О. Семенов; доктор фіз.-мат. наук Л. М. Христофоров; кандидат фіз.-мат. наук К. В. Григоришин; кандидат фіз.-мат. наук А. С. Жохін; кандидат фіз.-мат. наук В. В. Ігнатюк; кандидат фіз.-мат. наук В. Г. Козирський; кандидат фіз.-мат. наук О. Д. Кочерга; кандидат фіз.-мат. наук А. П. Махорт; кандидат фіз.-мат. наук О. М. Черняк.

УХВАЛИЛИ: вважати дисертаційну роботу О. В. Щур „Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків” завершеним науковим дослідженням і затвердити наступний висновок.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Щур Ольги Володимирівни „Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків” написана за матеріалами робіт, що виконані нею під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України (2018-2022 рр.) у відділі синергетики. Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України від 27 грудня 2018 р., керівником призначено доктора фіз.-мат. наук О.К. Відибіду.

Актуальність роботи.

Одне з основних питань в дослідженні мозку стосується процесів мислення. Частиною цього питання є проблема нейронного кодування. Це з'ясування механізмів кодування і переробки інформації/сигналів в реальних нейронних системах. Проблема

нейронного кодування є міждисциплінарною і потребує зусиль фізиків, математиків, кібернетиків, біологів. Одним з питань нейронного кодування є обробка сигналів/інформації у нейронах. 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. Такі часові інтервали називаються міжспайковими інтервалами. Якщо розподіл міжспайкових інтервалів є експоненційним та окремі міжспайкові інтервали 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 ауапсами. Такі нейрони мають зв'язки не лише з іншими нейронами, а й з самими собою. Тобто 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 динамічної системи. Така система зв'язаних між собою нейронів називається реверберативною нейронною мережею. 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 траєкторій реверберативної нейронної мережі до одного з аттракторів цієї динамічної системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертації проводились згідно з темами відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України:

1. «Динаміка утворення просторово-неоднорідних структур у багаточастинкових системах», № 0118U003535;
2. «Індуковані шумом динаміка та кореляції в нерівноважних системах», № 0120U101347;
3. «Математичні моделі нерівноважних процесів в відкритих системах», № 0120U100857.

Метою досліджень, проведених у дисертації, є дослідження впливу затриманого зворотного зв'язку на часову структуру активності імпульсних неадаптивних нейронів, а саме нейронів з ауапсами та нейронів у реверберативній нейронній мережі з затримками міжнейронної комунікації. Для досягнення поставленої мети було поставлено такі **задачі**:

1. дослідити статистику активності поодиноких імпульсних неадаптивних нейронів, а саме інтегруючого нейрона з втратами та зв'язуючого нейрона;
2. дослідити статистику активності імпульсних неадаптивних нейронів з гальмівним затриманим зворотним зв'язком при стимуляції стохастичним точковим процесом Пуассона, а також процесом відновлення;
3. дослідити статистику активності імпульсних неадаптивних нейронів зі збуджувальним затриманим зворотним зв'язком при стимуляції точковим процесом Пуассона;
4. з'ясувати фізичний механізм редуції інформації в ревербуючій нейронній мережі внаслідок самоорганізації в часовій області.

Серед **найбільш важливих наукових результатів**, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- 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 стохастичним 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 стохастичним 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 міжспайкових інтервалів 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 міжспайкових інтервалів 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 стимуляцією є загальний стохастичний точковий процес відновлення. Таке розширення представляє об'єктивні труднощі, оскільки загальний процес відновлення не має простих властивостей, притаманних процесу Пуассона. Результат проілюстровано на прикладі стимуляції процесом Ерланга.

- Було досліджено ревербативну динаміку імпульсної нейронної мережі, що викликана певними початковими умовами. Було з'ясовано, яким є фізичний механізм процесу прямування різних динамічних траєкторій, викликаних різними початковими умовами, до однієї динамічної траєкторії. Встановлено, що таким механізмом є генерація імпульсів нейронами.

Практичне значення одержаних результатів.

Робота має теоретичний характер. Отримані результати можуть бути використані при аналізі експериментальних даних, а саме гістограм міжспайкових інтервалів, щоб з'ясувати, чи має досліджуваний нейрон аутапси.

Особистий внесок здобувача.

У роботі [1] здобувачем було проаналізовано траєкторії імпульсної нейронної мережі за допомогою розроблених ним програм. Внесок здобувача у роботу [2] полягає у формулюванні постановки задачі (50 %), розробці методу розв'язання (50 %), розв'язанні задачі (100 %), чисельній перевірці (100 %), написанні і оформленні публікації (60 %). Внесок здобувача у роботу [3] полягає у формулюванні постановки задачі (100 %), розробці методу розв'язання (90 %), розв'язанні задачі (100 %), чисельній перевірці (100 %), написанні і оформленні публікації (80 %). Внесок здобувача у роботу [4] полягає у знаходженні твірної функції моментів та моментів функції розподілу вихідних міжспайкових інтервалів, чисельній перевірці (100 %), написанні і оформленні публікації (50 %). Внесок здобувача у роботу [5] полягає у розробці методу розв'язання (20 %), розв'язанні задачі (100 %), чисельній перевірці (100 %), написанні і оформленні публікації (95 %).

Основні результати дисертації викладені у 4 журнальних публікаціях та одному препринті:

- [1] Vidybida, A., Shchur, O.: Information reduction in a reverberatory neuronal network through convergence to complex oscillatory firing patterns. *BioSystems* 161, 24–30 (2017)
- [2] Vidybida, A., Shchur, O.: Relation Between Firing Statistics of Spiking Neuron with Delayed Fast Inhibitory Feedback and Without Feedback. *Fluct. Noise Lett.* 17, 1850005 (2018)
- [3] Shchur, O., Vidybida, A.: First Passage Time Distribution for Spiking Neuron with Delayed Excitatory Feedback. *Fluct. Noise Lett.* 19, 2050005 (2020)
- [4] Vidybida, A.K., Shchur, O.V.: Moment-Generating Function of Output Stream of Leaky Integrate-and-Fire Neuron. *Ukr. J. Phys.* 66, 254-259 (2021)
- [5] Shchur, O., Vidybida, A.: Firing statistics of a neuron with delayed feedback inhibition stimulated with a renewal process. *ArXiv eprints* (2021), arXiv: 2110.11161 [q-bio.NC]

Апробація результатів дисертації.

Матеріали роботи було представлено на семінарах в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, а також на таких конференціях та семінарах:

1. Neural Coding 2016: 12th International Neural Coding Workshop, 29 серпня - 2 вересня 2016 року, Кельн, Німеччина;
2. 17 Всеукраїнська школа-семінар зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, 8 - 9 червня 2017 року, Львів, Україна;
3. VIII Conference of Young Scientists «Problems of Theoretical Physics», 12 - 14 грудня 2017 року, Київ, Україна;
4. Боголюбовські читання 2018 присвячені 100-річчю Національної академії наук України, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, 22-23 лютого 2018 року;
5. Nonlinear analysis and application, 4-rd International Conference in memory of V.S.Melnik, 4 - 6 квітня 2018 року, Київ, Україна (2 доповіді);
6. 18 Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, 7 - 8 червня 2018 року, Львів, Україна;
7. IX Conference of Young Scientists «Problems of Theoretical Physics», 4 - 5 грудня 2018 року, Київ, Україна;
8. EPS conference «Statistical Physics of Complex Systems», 7 - 11 травня 2019 року, Стокгольм, Швеція;

- 9. 19 Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, 13 - 14 червня 2019 року, Львів, Україна;
- 10. Bogolyubov Kyiv Conference «Problems of Theoretical and Mathematical Physics», 24 - 26 вересня 2019 року, Київ, Україна;
- 11. X Conference of Young Scientists «Problems of Theoretical Physics», 23 - 24 грудня 2019 року, Київ, Україна;
- 12. Youth and Progress of Biology: XVI International Scientific Conference for Students and PhD Students, dedicated to the 75th anniversary of the faculty of biology of Ivan Franko national university of Lviv and 90th anniversary from the birthday of prof. M.P. Derkach, 27 - 29 квітня 2020 року, Львів, Україна;
- 13. Neural Coding 2021: 14th International Neural Coding Workshop, 26 - 30 липня 2021 року, Сіетл, США (2 доповіді);
- 14. Спільний семінар Wigner Research Center for Physics і Center for Cognitive Computation Центральноєвропейського університету, 29 березня 2022 року, Будапешт, Угорщина;
- 15. Семінар Інституту експериментальної медицини, 18 травня 2022 року, Будапешт, Угорщина;
- 16. 2022 International Conference on Mathematical Neuroscience - Digital Edition, 6 - 8 липня 2022 року.

О. В. Щур закінчила фізичний факультет Київського національного університету імені Т. Г. Шевченка (кафедра теоретичної фізики) у 2016 році, отримала диплом магістра фізики, і вступила до аспірантури Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України. Виконавши навчальний план О. В. Щур закінчує аспірантуру у 2022 році.

УХВАЛЕНО:

- 1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Щур Ольги Володимирівни за матеріалами дисертаційної роботи “Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків”.
 - 2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Щур О. В. відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.
 - 3. Рекомендувати дисертацію Щур О. В. “Часова структура активності імпульсних неадаптивних нейронів за наявності прямих і опосередкованих затриманих зворотних зв'язків” до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.
 - 4. Рекомендувати Вченій раді Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:
- Голова ради: Лев Богдан Іванович**, завідувач відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор, академік НАН України.

14

Рецензенти: Гончар Микола Семенович, завідувач лабораторії математичного моделювання Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор;

Христофоров Леонід Миколайович, головний науковий співробітник відділу теорії квантових процесів у наносистемах Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник.

Офіційні опоненти: Васильєв Олексій Миколайович, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри теоретичної фізики фізичного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка;

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

Керівник семінару

Заступник директора з наукової роботи
Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України
доктор фіз.-мат. наук

Володимир ЗАСЕНКО

Секретар засідання
провідний науковий співробітник
доктор наук з галузі "Природничі науки"
старший науковий співробітник

Андрій СЕМЕНОВ