



ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

УДК 517.946+517.948+612.821.6

В.Г. ПИСАРЕНКО

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *olga-gulchak@ukr.net*

Ю.В. ПИСАРЕНКО

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *pisarenkojv@gmail.com*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ УМОВНИХ РЕФЛЕКСІВ

Анотація. Запропоновано та проаналізовано базові принципи та підходи до математичного моделювання умовних рефлексів людини або тварини на основі розробленого математичного апарату диференціальних рівнянь із запізнювальним аргументом. Ця модель явно враховує уповільнену взаємодію групи взаємопов'язаних нейронів та ілюструє залежність швидкості прийняття рішень у реальних типових ситуаціях від величини запізнення проходження нейросигналу в ЦНС. Наведено фази механізму формування низки багатоланкових умовних рефлексів.

Ключові слова: математичне моделювання, багатоланкові умовні рефлекси, запізнення взаємодії нейронів, жива нейромережа, механізм запам'ятовування.

ВСТУП

Умовно-рефлекторна діяльність людини — універсальна закономірність у її поведінці пристосування та одна з функцій центральної нервової системи (ЦНС). Існує певний зв'язок нейрокібернетики з вченням про умовні рефлекси. Запропонована робота розвиває праці авторів щодо використання математичного апарату диференціальних рівнянь із запізнювальним аргументом для описування функціонування нейромережі ЦНС тварин або людини.

Мета праці — розробити базові принципи та підходи до математичного моделювання умовних рефлексів людини саме на основі авторського математичного апарату диференціальних рівнянь із запізнювальним аргументом, а також створити основи математичних моделей умовних рефлексів (УР) пацієнтів, що ілюструють залежність швидкості прийняття рішень у реальних типових ситуаціях від величини запізнення проходження нейросигналу в ЦНС.

КОНЦЕПЦІЯ КАСТОВОГО КОДУ В КОНТЕКСТІ БАГАТОЛАНКОВИХ УР У НЕЙРОСИСТЕМІ

Існує відома низка можливих механізмів формування структури так званих багатоланкових УР (БЛУР) і нейронних механізмів надшвидкого відшукування актуальної інформації в комплексі параметрів нейросистеми живого організму. В одному з таких механізмів може бути використано авторську концепцію так званого «кастового коду» у нейросистемі.

Без усвідомлення того факту, що існує потрібний кастовий код у живій нейросистемі, без урахування багатоступінчастості більшості УР для організму людини або хребетних є вкрай проблематичним (а швидше за все і неможли-

© В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко, 2022

вим) виконання за найкоротший час (за частку секунди) живою нейросистемою життєво важливого завдання. Воно полягає в тому, що для виживання необхідно для імпульсів тривожної активності нейронів дуже швидко відшукати критично потрібний оптимальний шлях для врятування життя організму серед приблизно 100 млрд. нейронів, сполучених між собою значно більшою кількістю відростків-дендритів. Щоб у цій небезпечній ситуації спрацював увесь багатоланковий автоматизм, тривожні сигнали від групи сенсорів надходять до кори мозку з генерацією у ній необхідних відповідних сигналів дії як команди «працювати необхідним моторним нейронам». І, своєю чергою, такі моторні нейрони повинні, наприклад, майже миттєво змусити спрацювати відповідний м'яз кінцівок, щоб встигнути уникнути виявленої смертельної небезпеки. При цьому вражає те, що вся ця процедура відшукування потрібного ланцюжка нейронів для прийняття оптимального рішення мозком та її виконання моторними нейронами повинна безпомилково реалізуватися за найкоротший термін в обсязі головного мозку! При тому, що ціною помилки є життя.

АВТОРСЬКА КОНЦЕПЦІЯ МОДЕЛІ БАГАТОЛАНКОВИХ УР

Розглянемо процес моделювання оперативного розпізнавання нервовою системою хребетного процесу, що розвивається в режимі реального часу, а саме надходження ззовні на сенсори організму інформації про раптові небезпечні зміни зовнішнього світу, які було оперативно зареєстровано сенсорами деякого організму у вигляді тимчасової послідовності сигналів.

Життєздатність популяції конкретного виду живих організмів (і очевидно, окремих його представників) залежить принаймні від таких факторів:

— точності фіксації індивідуальної черговості в режимі реального часу надходження сигналів на низку сенсорів організму (аферентні сигнали, що надходять для хребетних у неокортексе);

— надійності адекватного запам'ятовування та збереження в режимі реального часу подібної інформації (у вигляді аферентних сигналів, які можна назвати БЛУР);

— точності реалізації УР у формі надходження потрібної послідовності низхідних (еферентних) сигналів з неокортексу на відповідні «потрібні» моторні нейрони;

— адекватності спрацьовування відповідних моторних нейронів.

Зрозуміло, що в боротьбі за життєві ресурси та виживання конкретного організму (це можна образно назвати «фільтром життя») перемагають ті індивідууми, у яких запис та зчитування подібної інформації про зовнішній світ (наприклад, пошук їжі, уникнення статусу статі їжею ворогів, реалізація вимог інстинкту репродукувати та зберегти свою зграю, популяцію тощо) відбуваються максимально повно і в темпі перебігу часу, який адекватний темпу мінливості базових атрибутів поточної реальності.

ПРО РЕСУРСИ ЦНС ДЛЯ МОБІЛІЗАЦІЇ ВСІХ СИЛ ОРГАНІЗМУ ЗА ЯВНОЇ ЗАГРОЗИ ЙОГО ЖИТТЮ

Є перспективною гіпотеза про можливий (і, мабуть, властивий для більшості живих нейросистем) механізм керування величиною вкладу нейронних збуджень рятувальної для цього організму частоти f_i із застосуванням оптимального вибору (наприклад, методом перебору варіантів) у процесі адаптації до деякої екстремальної ситуації у спеціальному режимі уваги до всього організму. При цьому для активізації необхідної реакції на головній частоті f_a та мобілізації відповідних усіх сил організму потрібно негайне зчитування частоти стимулювання f_2 реакції у відповідь, властивої відповідним моторним нейронам з їхнім декрементом затухання h_1 . Така процедура може бути актуальною у випадку прямої загрози життю всього організму.

Наведемо приклад, що ілюструє таке твердження.

По-перше, ці вочевидь потрібні організму для роботи фільтра життя функції

пред'являють жорсткі вимоги до точності запам'ятовування відповідних згаданих раніше БЛУР. Але за результатами аналізу численної спеціальної літератури з відповідної галузі нейрофізіології слід визнати, що сьогодні, по суті, немає несуперечливої інформації про те, як саме працює в реальному організмі хребетного цей названий майже очевидним алгоритм фільтра життя.

З огляду на це як гіпотезу авторів цієї статті запропоновано достатньо імовірний варіант логічного механізму (та його математичної моделі) функціонування деякого фільтра життя, заснованого на використанні динамічної моделі взаємодії нейронів у процесах запису та зберігання подібної інформації в пам'яті нейронів, а також у процесі зчитування у потрібні моменти цієї інформації для виконання дій, близьких до оптимальних та критично потрібних для виживання організму. При цьому запропонована модель фільтра життя заснована, зокрема, на використанні формалізму диференційних рівнянь із запізнювальним аргументом, наведених у [1–3] для задач описування взаємодії нейронів живої нейромережі.

По-друге, процес запам'ятовування конкретного образу (на прикладі роботи вербальних каналів навчання типу стимул–реакція) складається з трьох основних фаз еволюції патернів імпульсів:

— на першій фазі процесу мають місце випадкові потрапляння в деякий певний нейрон з подальшим формуванням феномена специфічних багаторазово збуджених нейронів (СБЗН);

— на другій фазі виникає низка сузір'їв специфічних багаторазово збуджених нейронів (ССБЗН), сформованих декількома сусідніми СБЗН;

— на третій фазі з'являються тимчасові когнітивні колективні комплекси нейронів у середині кожного ССБЗН.

В останній фазі в кожному ССБЗН нейрони зберігають своє групове збудження з постійною ротацією збуджених (як вахтових нейронів) і неактивних нейронів. Правомірно припустити, що тривалість такої ротації нейронів із ССБЗН визначає силу навички запам'ятовування цієї нової інформації. З огляду на викладене вважаємо доречним запропонувати корисний для практики моделювання пам'яті спеціальний граф (рис. 1), який моделює процедуру формування в режимі реального часу конкретного умовного багатоланкового рефлексу.

Вхідні дані модуля прийому сенсорної інформації передаються процесору вибору оптимальних рішень (з урахуванням вихідних даних модуля прийому інформації та БД «Життєвий досвід»). Ці оптимальні рішення передаються у вигляді команд моторним нейронам MN_1 , MN_2 , MN_3 і т.д. (у нейрофізіології вони називаються ефекторними імпульсами) для виконання організмом квазіоптимальних дій у певній ситуації, наприклад, зближуватися з виявленим об'єктом-незнайомцем або захоплювати його (у разі ідентифікації його як об'єкта спарювання або їжі), або тікати у разі впізнання у незнайомому організмі небезпечного ворога.

На рис. 1 показано запропоновану авторами у вигляді графу процедуру надходження в ЦНС деякого хребетного- j (наприклад, конкретної тварини) послідовних у режимі реального часу пакетів інформаційних імпульсів (центробіжних імпульсів, які в нейрофізіології мають назву афекторні імпульси) від різних сенсорних нейронів. Наприклад, Zv_1 і Zv_2 — інформаційні імпульси від першого і другого сенсорів звуків, що насторожують; $Zп_1$ і $Zп_2$ — від першого і другого сенсорів запаху від об'єкта (істоти, що наближається); $Tк_1$ і $Tк_2$ — від першого і другого тактильних сенсорів (під час контактного обмацування наближеної істоти цим хребетним- j); $См_1$ і $См_2$ — від сенсорів смаку того ж хребетного- j (під час облизування іншої істоти, яка видається потенційною їжею або об'єктом спарювання).

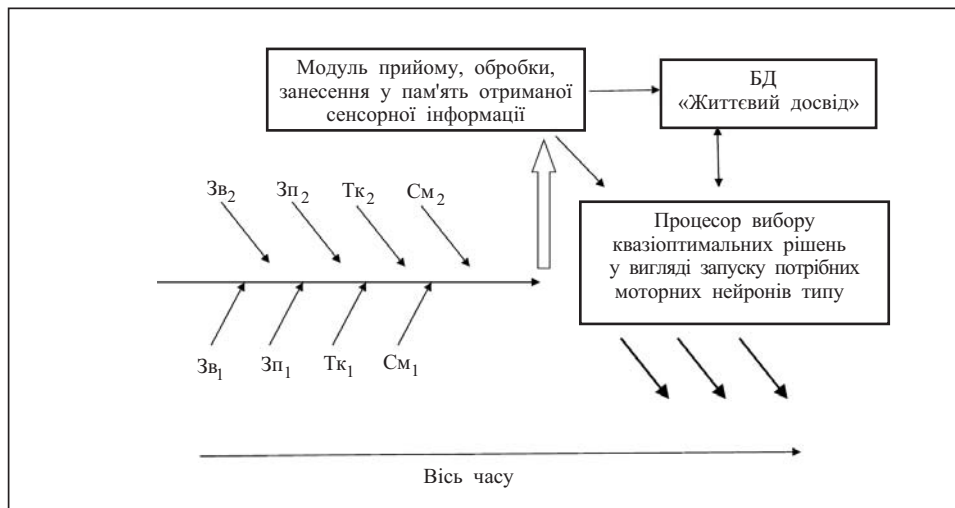


Рис. 1

КОНЦЕПЦІЯ МЕХАНІЗМУ УТВОРЕННЯ УР «А-В-С» ЯК ФОРМУВАННЯ ЧЕРГОВОЇ НАВИЧКИ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ, ЯКИЙ ДАЛІ ДЕЯКИМ ЧИНОМ ЗБЕРІГАЄТЬСЯ У ПЕВНІЙ ГРУПІ НЕЙРОНІВ

Наведемо запропонований авторський алгоритм формування в організмі нового конкретного УР «А-В-С», який напрацьовується в живому організмі на базі навичок практичного досвіду, який надалі закріплюється і зберігається у певній групі нейронів.

Є достатньо підстав вважати, що черговий умовний рефлекс-навичка формується за рахунок «закріплення» за ним певної групи нейронів (назвемо цю групу конкретним нейрокластером), пов'язаних між собою за допомогою певної кількості синапсів і дендритів. При цьому за цим УР можуть бути закріплені (на деякий час) як певна група нейронів перед тим вільних або напіввільних (через нечисленність зв'язків з нейронами-сусідами), так і тих нейронів, участь яких у інших (попередніх УР) через зв'язки з нейронами-сусідами відбувалася рідше (а тому виявлялася слабкопідкріпленою енергетичними ресурсами організму).

За вказаних причин та за даних нейрофізіологічної практики висока ймовірність закріплення (через нові дендрити і синапси) раніше слабкозакріплених напіввільних нейронів з іншими нейронами, що існують у певному активно вираженому УР. Цей процес і відповідний результат можна умовно назвати процесом перевербування напіввільних нейронів. Незважаючи на завмирання (за вказаних причин) конкретного напіввільного нейрона, прикріплені раніше до нього синапси і дендрити можуть переєднатися до якогось сусіднього нейрона, беручи після цього участь у функціонуванні якоїсь нової групи нейронів (тобто іншого нейрокластера, що забезпечує дію деякого нового або відновленого УР [1–3]).

Зауваження 1. Далі наведено низку властивостей подібних розв'язків вихідної системи диференціальних рівнянь із запізнювальним аргументом, які схожі з механізмом формування низки УР.

ГІПОТЕЗА ПРО ІСНУВАННЯ В ЖИВОМУ ОРГАНІЗМІ ГЕНЕРАТОРА АВТОМАТИЗМІВ ЗА К.В. БАЄВИМ (РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМУ НА ПЕВНИЙ ЗОВНІШНІЙ СТИМУЛ)

На думку авторів, перспективну концепцію генерації патернів імпульсів у ЦНС запропонував у [4] професор К.В. Баєв. Згідно з цією концепцією з'явилась гіпотеза про існування в ЦНС оперативного керування функціонуванням підсистем організму людини та вищих тварин на основі деякої моделі функціонування підсистем усього організму (МФПО).

Відповідно до гіпотези К.В. Баєва саме функціонування цієї МФПО забезпечує квазіоптимальну реакцію організму на зміну зовнішніх умов: за результатами оброблення оперативно надходять аферентні імпульси сигналів від сенсорів організму про зовнішнє оточення, що змінюється. Таке «рішення

організму», за К.В. Баєвим, генерується оперативно з використанням певного оброблення в МФПО цих сенсорних сигналів і подальшим зіставленням їх з моделлю функціонування всього організму для генерації відповідних корисних (як оптимальних) ефекторних імпульсів, спрямованих на відповідні моторні нейрони. Останні, за К.В. Баєвим, повинні забезпечувати квазіоптимальну реакцію організму (наприклад, тікати за явних ознак небезпеки чи зближуватися в процесі розпізнавання потенційної їжі чи під час появи об'єкта спарювання). Натомість більш-менш конкретні механізми реалізації запропонованої процедури генерації потрібних (оптимальних) ефекторних імпульсів у відповідні моторні нейрони, так само як і структуру згаданої МФПО, К.В. Баєв не наводить.

З огляду на викладене можна розглядати кілька ключових компонентів і конкретних механізмів, що доповнюють і наповнюють модель типу запропонованої К.В. Баєвим. Зокрема, і можливо, і доцільно явно конкретизувати деякі нейромережіві механізми, які безпосередньо формують моделі поведінки цього організму в типових життєвих ситуаціях.

Динаміку добре відомого нейрофізіологам процесу конкуренції деякого нейрокластера за зміцнення свого пріоритету перевербуванням певної групи нейронів (перед тим останні беруть участь у реалізації іншого рефлексу, який став менш актуальним нейрокластером), на думку авторів, можна моделювати системою нелінійних диференціальних рівнянь типу моделі Вольтерра–Лотки. Ця модель описує конкуренцію різних видів біоти (це так звана модель динаміки системи хижак–жертва). При цьому популяція нейронів, що належать нейрокластеру сильного і актуального в цей момент УР, ніби відіграє роль хижака по відношенню до жертви у вигляді нейронів з нейрокластера, що зберігає ослаблений і малоактуальний в цей момент УР. Процес перевербування напіввільних нейронів з категорії ослаблених УР для участі в новому актуальному для організму УР із категорії сильних УР у запропонованій моделі типу Вольтерра–Лотки можна описати за допомогою такої системи нелінійних рівнянь:

$$dV(t) / dt = \lambda V(t) + \beta V(t)W(t), \quad (1)$$

$$dW(t) / dt = \mu W(t) - \beta V(t)W(t), \quad (2)$$

де $V(t)$ і $W(t)$ — відповідно концентрації популяції нейронів-хижаків і нейронів-жертв, λ та μ — темпи зростання популяцій нейронів-хижаків і нейронів-жертв відповідно, β — інтенсивність процесу «перевербування» нейронів-жертв у нейрони-хижаки.

Отже, у запропонованій авторській моделі функціонування живої нейромережі створено новий математичний базис опису механізму запам'ятовування та накопичення важливої для виживання організму інформації, основаної на врахуванні наявності запізнювальної взаємодії нейронів у процесі передачі інформації. Ця модель може описувати основу процесу взаємодії ансамблів нейронів під час запам'ятовування і збереження життєво важливої інформації.

ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВЧЕННЯ ПРО УР У МЕДИЧНІЙ ПРАКТИЦІ

Принципи біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ) використовують у так званій БЗЗ-терапії. Механізм УР є теоретичною основою створення базових принципів цієї БЗЗ-терапії.

Виникнення БЗЗ-терапії пов'язано з працею дослідників мозку — вченого Б. Стермана і його співробітників. Відкриттю БЗЗ-технологій передували дослідження, які показали, що умовно-рефлекторне навчання (або інструменталізація) є ефективним не тільки, наприклад, для виконання команди «служи» собакою, а й для посилення так званого сенсомоторного ритму, спостережуваного в електроенцефалограмі кицьки. Хоча за науковою логікою в цьому немає нічого незвичайного, але, коли цей факт було вперше виявлено, вчених це по-справжньому шокувало.

Вченим Б. Стерманом [5, 6] з його колегами під час дослідів з кицьками, зокрема, було виявлено, що тварини, щоб отримати їжу, можуть навчитися

вибірково і фактично довільно посилювати електричний мозковий потенціал певної частоти та в певній області мозку. Якщо мозок тварини можна за винагороду навчити належним чином змінювати свій електричний потенціал, то такі дії мають бути також доступні і людині. Звідси можна дійти оптимістичного висновку про далекосяжні можливості самовпливу людини (наприклад, впливу хворого на свій мозок), тобто висновку про можливість вироблення за замовленням самої людини правильного та актуального УР, а це вже є можливістю саморегуляції мозкової активності. Наприклад, якщо хворий має діагноз, за яким біоелектричний потенціал мозку певним чином деформовано, то існує можливість перевчити мозок цього хворого так, щоб зовсім усунути або достовірно знизити виразність цих деформацій мозку в його електричній сигнатурі.

ВИСНОВКИ

Розглянуто процес моделювання оперативного розпізнавання нервовою системою хребетного процесу, що розвивається в режимі реального часу.

Створено новий математичний базис опису механізму запам'ятовування та накопичення важливої для виживання організму інформації, основаної на врахуванні наявності запізнювальної взаємодії нейронів у процесі передачі інформації.

У процесі моделювання УР [7–9] автори цієї статті разом з колективом співробітників розробили базові принципи діагностики залежностей різної природи у пацієнтів на основі моделювання відповідних УР. Ця робота проводилася за підтримки партнерів — Клініки активної терапії особливих станів (АТОС) під керівництвом д.м.н. Ю.В. Пакіна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сотников О.С., Парамонова Н.М. Цитоплазматическая синцитиальная связь — одна из трех форм межнейронной связи. *Успехи физиологических наук*. 2010. Т. 41, № 1. С. 45–57.
2. Соколова О.О. Нейронная пластичность и экспрессия генов. *Успехи физиологических наук*. 2010. Т. 41, № 1. С. 26–44.
3. Яненко В.М. Устойчивые и неустойчивые режимы самоорганизации в динамических моделях развивающихся систем. *Проблемы нелинейных и турбулентных процессов в физике*. Ч. 2. Киев: Наукова думка, 1985. С. 124–128.
4. Баев К.В. Решение проблемы центральных генераторов паттернов и новая концепция функций мозга. *Нейрофизиология (Neurophysiology)*. 2012. Т. 44, № 5. С. 469–489.
5. Первая в Украине система обучения мозга. URL: <https://sqlab.com.ua/600544-pervaya-v-ukrayne-systema-obuchenyua-mozga/>.
6. Advanced Neurotherapy. Spotlight on Dr. Barry Sterman: The beginnings of neurofeedback. December 11, 2019. URL: <https://www.advancedneurotherapy.com/blog/2015/01/15/neurofeedback-sterman-neuroscience>.
7. Pisarenko V.G. Simulation of the problem of interaction of neurons taking into account the lagging of their interaction. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54, Iss. 3. P. 513–516. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0052-x>.
8. Pisarenko V. Modeling of the interaction for a living neural network by artificial intelligence technologies. *Міжвідомчий науково-технічний журнал «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2019. Т. 35, № 2. С. 64–69. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197433>.
9. Коваль О.С. Проміжні стадії подібного до людського штучного інтелекту. *Штучний інтелект*. 2020. № 25. С. 7–12. <https://doi.org/10.15407/jai,2020.01.007>.

V.G. Pisarenko, Yu.V. Pisarenko

MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF CONDITIONED REFLEXES

Abstract. The basic principles and approaches to mathematical modeling of conditioned reflexes in a human or animal on the basis of the developed mathematical apparatus of differential equations with a delayed argument are proposed and analyzed. This model clearly takes into account the slow interaction of a group of interconnected neurons and illustrates the dependence of the decision-making speed in real typical situations on the magnitude of the delay in the passage of a neuro signal in the CNS. The mechanism of generating a number of conditioned reflexes, the so-called multi-link conditioned reflexes, is shown.

Keywords: mathematical modeling, multilevel conditioned reflexes, delayed interaction of neurons, living neural network, memory mechanism.

Надійшла до редакції 25.05.2022