

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. К. Колесницький,
В. І. Месюра

НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ.
НЕЙРОКОМП'ЮТЕРИ

Частина I

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 004.93
К60

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, України (протокол № 13 від 29.04.2021 р.)

Рецензенти:

А. Я. Кулик, доктор технічних наук, професор

Т. Б. Мартинюк, доктор технічних наук, професор

Л. М. Куперштейн, кандидат технічних наук, доцент

Колесницький, О. К.

К60 Нейромережеві моделі та технології обчислювального інтелекту. Нейрокомп'ютери. Частина I : навчальний посібник / О. К. Колесницький, В. І. Месюра. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 66 с.

ISBN ISBN 978-966-641-871-8

Посібник присвячено матеріалам лекційного курсу з дисципліни «Нейромережеві моделі та технології обчислювального інтелекту» для здобувачів III (освітньо-наукового) рівня вищої освіти підготовки докторів філософії денної і заочної форм навчання спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

У посібнику розглянуто загальні принципи побудови архітектури нейрокомп'ютерів. Наведено обґрунтування вибору спайкінгових нейронних мереж як операційного блоку нейрокомп'ютерів. Розглянуто моделі та структури спайкінгових нейронних елементів та мереж, а також методи нейрокомп'ютерної обробки інформації на їх основі. Наведено аналітичний огляд міжнародних науково-технічних проектів з апаратної реалізації спайкінгових нейронних мереж.

УДК 004.93

ISBN 978-966-641-871-8

© ВНТУ, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОКОМП'ЮТЕРІВ.....	5
1.1 Розвиток поняття нейрокомп'ютер.....	5
1.2 Огляд принципів побудови архітектури нейрокомп'ютера	8
1.3 Обґрунтування вибору спайкінгових нейромереж як операційного блока нейрокомп'ютера	11
1.4 Удосконалення принципів побудови архітектури нейрокомп'ютера.	13
1.5 Контрольні запитання	16
2 АРХІТЕКТУРА СПАЙКІНГІНГОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ І НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ БАГАТОВИМІРНИХ СИГНАЛІВ	17
2.1 Моделі спайкінгових нейронних елементів	17
2.1.1 Формальні моделі спайкінгових нейронних елементів	19
2.1.2 Модель спайкінгового нейронного елемента з роздільними входами	23
2.2 Структура спайкінгової нейронної мережі.....	28
2.2.1 Аналіз моделі і структури спайкінгової нейронної мережі	28
2.2.2 Вдосконалення структури спайкінгової нейронної мережі	31
2.3 Метод навчання спайкінгових нейронних мереж	33
2.4 Метод розпізнавання багатовимірних сигналів з використанням спайкінгової нейронної мережі.....	38
2.5 Контрольні запитання	42
3 ПРОЕКТИ З АПАРАТНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СПАЙКІНГОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	44
3.1 Огляд відомих проектів з апаратної реалізації спайкінгових нейронних мереж.....	44
3.2 Недоліки відомих проектів з апаратної реалізації спайкінгових нейронних мереж та шляхи їх подолання	54
3.3 Архітектура апаратної реалізації оптоелектронної спайкінгової нейронної мережі	55
3.4 Оцінення технологічних параметрів оптоелектронної спайкінгової нейронної мережі	58
3.5 Перспективи подальших досліджень	58
3.6 Контрольні запитання	61
ЛІТЕРАТУРА.....	62

ВСТУП

Сьогодні на питання «Які засоби краще розв'язують важкоформалізовані і неформалізовані задачі?» відповідь очевидна – нейрокомп'ютери. Нейрокомп'ютер – це інформаційна система, основним процесорним ядром якої є штучна нейронна мережа (на відміну від мікропроцесора), а основним принципом функціонування є навчання на прикладах (на відміну від програмування) [1, 2]. Більшість сучасних нейрокомп'ютерних засобів існують у вигляді програмних або програмно-апаратних реалізацій, але загальновідомим є той факт, що максимум переваг від застосування нейрокомп'ютерів можна отримати саме у разі їх апаратної реалізації [2]. На сьогодні, на жаль, не створено ефективною апаратної реалізації нейрокомп'ютера. Ефективною вважається така апаратна реалізація нейрокомп'ютера, яка містить максимально можливу кількість нейронів (в ідеалі – близьку до кількості нейронів у мозку людини: 5×10^{10}) і водночас займає мінімальний об'єм і споживає мінімум енергії. Протягом останніх років спостерігається впевнений перехід від традиційних нейронних мереж на основі бінарних та аналогових нейронів з потенційними сигналами до так званих спайкінгових нейромереж з імпульсними сигналами [3, 4]. Спайкінгові нейромережі є більш подібними до своїх біологічних прототипів, а тому мають більші потенційні можливості в досягненні адекватного відтворення інтелектуальних функцій мозку. Реалізація подібних мозку нейрокомп'ютерів дозволить вирішити 2 взаємно пов'язані задачі:

1) створення «розумних» комп'ютерів для виконання складних когнітивних неформалізованих завдань;

2) розкриття таємниць роботи мозку шляхом його зворотного конструювання технічними засобами.

Найближчою стратегічною метою є розробка нейроморфних ядер (чипів апаратних нейромереж), які зацікавлені дослідники зможуть використовувати для перевірки своїх власних гіпотез і теорій щодо принципів роботи кори мозку та для побудови на їх основі різноманітних нейрокомп'ютерних засобів для практичних застосувань.

1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОКОМП'ЮТЕРІВ

Великим завданням нейрокомп'ютерної техніки є розробка гнучких, подібних мозку, архітектур нейрокомп'ютерів, здатних до широкого спектра реально-часових застосувань. Водночас потрібно прагнути до максимально можливої кількості нейронів (в ідеалі – як у мозку людини – 10^{11}) та до ультра низьких потужностей споживання і компактного розміру, як у біологічних нейронних систем. Створення подібних мозку нейрокомп'ютерів дозволить вирішити 2 взаємно пов'язані задачі: 1) створення «розумних» комп'ютерів для виконання складних когнітивних неформалізованих завдань; 2) розкриття таємниць роботи мозку людини шляхом його зворотного конструювання технічними засобами. Найближчою стратегічною метою є створення нейроморфних ядер (чипів апаратних нейромереж), які інші вчені зможуть використовувати для перевірки своїх власних теорій щодо принципів роботи кори мозку і для побудови на їх основі різноманітних нейрокомп'ютерних систем для практичних застосувань. Ці нові знання можуть бути потім використані в наступному поколінні нейроморфних ядер.

У науковій літературі існує велика кількість інформації про різноманітні архітектури побудови нейрокомп'ютерів. Оскільки всі відомі нейрокомп'ютери можна розділити на 3 великих класи (програмні, програмно-апаратні та апаратні), то і архітектури також можна розглядати для програмних [1, 2], програмно-апаратних [3,4] та апаратних нейрокомп'ютерів [4]. Оскільки максимум переваг нейрокомп'ютерів перед традиційними комп'ютерами можна отримати тільки у випадку їх апаратної реалізації [4,5], то будемо розглядати тільки архітектури апаратних нейрокомп'ютерів. Для аналогії можна згадати широко відомі принципи побудови цифрових комп'ютерів, сформульовані свого часу Джоном фон Нейманом [6].

1.1 Розвиток поняття нейрокомп'ютер

Схемотехнічний (конструктивно-технологічний) та системотехнічний (архітектурний) аспекти розробки засобів комп'ютерної техніки тісно пов'язані один з одним, що відіграє важливу роль під час вибору оптимальної стратегії проектування комп'ютерів [7]. Це положення повністю стосується і нейрокомп'ютерів. Тут навіть важко визначити, що є первинним, а що вторинним. З одного боку, нові архітектурні рішення стимулюють розвиток технології, а з іншого боку, досягнення технології наштовхують на зміну архітектурних рішень і так далі; ці два процеси циклічно розвиваються по зростаючій спіралі.

Поняття «нейрокомп'ютер» на сьогоднішній день не має усталеного означення. Смісл цього поняття змінювався із розвитком нейро-

ЛІТЕРАТУРА

1. Миркес Е. М. Нейрокомпьютер. Проект стандарта / Миркес Е. М. – Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998. – 188 с.
2. Концепция и архитектура программного нейрокомпьютера SNC : материал технической информации / В. И. Гриценко, И. С. Мисуно, Д. А. Рачковский и др. // Управляющие системы и машины. – 2004. – № 3. – С. 3–14.
3. Круг П. Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры : учебное пособие / Круг П. Г. - М. : Издательство МЭИ, 2002. – 176 с.
4. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: учебное пособие для вузов / Галушкин А. И. - М. : ИПРЖР, 2000. - 528 с.
5. Бардаченко В. Ф. Перспективи застосування імпульсних нейронних мереж з таймерним представленням інформації для розпізнавання динамічних образів // В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький // УСiМ. – 2003. – № 6. – С. 73–82.
6. Von Neumann, J. The General and Logical Theory of Automata / J. Von Neumann // in Cerebral Mechanisms in Behavior (ed. L. A. Jeffress). – New York : Wiley, 1951. – pp. 1–41.
7. Мотоока Т. Копьютеры на СБИС: в 2-х кн. / Мотоока Т., Томита С., Танака Х. ; пер. с япон. – М. : Мир, 1988. – 392 с.
8. Pulsed Neural Networks / W. Maass and C. M. Bishop, editors. - MIT Press : Cambridge. - 2001. - 377 p.
9. Архитектура ЭВМ. Курс дистанционного обучения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.lessons-tva.info/edu/e-inf1/e-inf1-2-2.html>
10. Комарцова Л. Г. Нейрокомпьютеры : учебное пособие для вузов / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2004. – 400 с.
11. Natschläger T. The «liquid computer»: A novel strategy for real-time computing on time series / T. Natschläger, W. Maass, H. Markram // Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK, v.8, No1: pp.39-43, 2002.
12. Колесницький О. К. Метод розпізнавання багатовимірних часових рядів при допомозі імпульсних нейронних мереж / О. К. Колесницький, Самра Муавия Хамо // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. - № 2(6). - С. 86–93.

13. Kolesnytskyj O. K. Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices / O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, S. S. Yaremchuk // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2010. – Vol. 19. – № 2. – P.154–165.
14. Колесницький О. К. Компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. – 2010. – № 2. – С. 54–62.
15. Колесницький О. К. Математична модель імпульсного нейроелемента на біспін-приладі / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2011. – № 5. – С. 141–149.
16. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи та структури : монографія / В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 126 с.
17. Большая медицинская энциклопедия / [Гл. ред. Петровский Б. В.]. – М. : Советская энциклопедия, 1981. – Т. 16. – 512 с.
18. Антомонов Ю. Г. Принципы нейродинамики / Ю. Г. Антомонов, Котова А. Б. – К. : Наукова думка, 1974. – 194 с.
19. Антомонов Ю. Г. Введение в структурно-функциональную теорию нервной клетки / Ю. Г. Антомонов, А. Б. Котова. – К. : Наукова думка, 1976. – 263 с.
20. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Вища школа, 1986. – 238 с.
21. Spiking Neuron Models [Електронний ресурс] / Wulfram Gerstner and Werner M. Kistler // *Single Neurons, Populations, Plasticity (Cambridge University Press, 2002)*. – Режим доступу : <http://diwww.epfl.ch/~gerstner/BUCH.html>
22. Кнаб О. Д. Биспин — новый тип полупроводниковых приборов / О. Д. Кнаб // *Электронная промышленность*. – 1989. – № 8. – С. 3–8.
23. Василецький С. А. Оптоелектронні частотно-динамічні нейронні елементи: дис. канд. техн. наук : 05.13.05 / Василецький Сергій Анатолійович. — Вінниця, 2003. – 146 с.
24. Василецький С. А. Математичне та комп'ютерне моделювання оптоелектронного частотно-динамічного нейронного елемента / С. А. Василецький, О. К. Колесницький // *Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології*. – 2001. – № 2. – С. 96–101.
25. What makes a dynamical system computationally powerful? / [R. Legenstein, W. Maass, S. Haykin and oth.] // *New Directions in Statistical Signal Processing: From Systems to Brain*. – Cambridge, MIT Press, 2007. – P. 127–154.

26. Maass W. Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations / W. Maass, T. Natschläger, H. Markram // *Neural Computation*. – 2002. – Vol. 14(11). – P. 2531–2560.
27. Natschläger T. Computer models and analysis tools for neural microcircuits / W. Maass, T. Natschläger, H. Markram ; in edit. R. Kötter // *Neuroscience Databases. A Practical Guide. Chapter 9*. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. – P. 123–138.
28. Jaeger H. Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication / H. Jaeger, H. Haas // *Science*. – 2004. – Vol. 5. – P. 78–80.
29. Maass W. Fading memory and kernel properties of generic cortical microcircuit models / W. Maass, T. Natschläger, and H. Markram // *Journal of Physiology*. – 2004. Vol. 98(4–6). – P. 315–330.
30. Maass W. Temporal integration in recurrent microcircuits / W. Maass and H. Markram ; in edit. M. A. Arbib // *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. – Cambridge : MIT Press, 2003. – P. [2] 1159–1163.
31. Волоконная оптика и приборостроение / [Бутусов М. М., Галкин С. Л., Оробинский С. П., Пал Б. П.]. – Л. : Машиностроение, 1987. – 327 с.
32. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Уоссермен Ф. – М. : Мир, 1992. – 240 с.
33. Пространственные модуляторы света / [А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов]. – М. : Радио и связь, 1987. – 356 с.
34. Колесницький О. К. Методи і засоби розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсних нейронних мереж : монографія / Колесницький О. К. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 120 с.
35. Саймон Хайкин. Нейронные сети: полный курс / Саймон Хайкин ; [2-е изд.; пер. с англ.] – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
36. Ротштейн А. П. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий / А. П. Ротштейн, П. Д. Кузнецов. – К. : Техніка, 1992. – 180 с.
37. Hertz J. Introduction to the Theory of Neural Computation / J. Hertz, A. Krogh, and R. G. Palmer. – Boston : Addison-Wesley Reading, Mass., 1991. – 432 p.
38. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов / Сергиенко А. Б. – С-Пб. : Питер, 2006. – 307 с.
39. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов : уч. пособие / Новиков Л. В. – С-Пб. : ООО «Модус+», 1999. – 152 с.
40. THE BLUE BRAIN PROJECT EPFL [Электронный ресурс] / Henry Markram. – Режим доступа: <http://bluebrain.epfl.ch/>

41. SpiNNaker - A Universal Spiking Neural Network Architecture. SpiNNaker Overview [Электронный ресурс] / Steve Furber, Andrew Brown. – Режим доступа: <http://apt.cs.man.ac.uk/projects/SpiNNaker>.

42. DARPA SyNAPSE Program [Электронный ресурс] / Дхармендра Мода. – Режим доступа: <http://www.artificialbrains.com/darpa-synapse-program#256processor>

43. NeuroGrid Project. Grid technology for neuroscience [Электронный ресурс] / Andrew Simpson. – Режим доступа: <http://www.neurogrid.ac.uk/>

44. BrainScaleS – Neuromorphic processors [Электронный ресурс] / Karlheinz Meier. – Режим доступа: <http://www.artificialbrains.com/brainscales/>

45. Princeton Optronics' Advanced High-Power Diode Lasers [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.princetonoptronics.com/pdfs/HighPowerVCSELarrays.pdf>

46. КМОП-фотодиодные СБИС – перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации / А. Стемпковский, В. Шилин // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 2. – С. 14–20.

47. Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation / Oleh K. Kolesnytskyj; Vladislav V. Kutsman; Krzysztof Skorupski; Mukaddas Arshidinova, Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 1117609 (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2536607

Навчальне видання

Олег Костянтинович Колесницький
Володимир Іванович Месюра

**НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ.
НЕЙРОКОМП'ЮТЕРИ**

Частина I

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *О. Колесницьким*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет підготувала *Т. Криклива*

Підписано до друку 13.09.2021.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 3,96.
Наклад 50 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2021-093.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
Email: irvc.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.