

СВОЙСТВА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ

Морозов В.П., д-р техн. наук, доц., проф. ФГБОУ ВО ВГТУ

Белоусов В.Е., канд. техн. наук, доц., доц. ФГБОУ ВО ВГТУ

Мистров Л.Е., д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Центрального филиала «РГУП», гл. спец. ФГБУ «Институт стандартизации»

Сырин А.И., соискатель, Войсковая часть 38953-к

В статье предложено определение нейроморфной системы и раскрыты основные причины ее появления, такие как: продуктивное исследование информационных процессов в различных биологических системах, в том числе мозге человека; появление спайковых (импульсных) сетей – нового класса нейронных сетей, адекватно моделирующих подобные информационные процессы; необходимость реализации полученных знаний в данной предметной области на практике в виде нейроморфных процессоров, возможности по быстродействию которых на порядки превышают возможности существующих самых производительных процессоров. Приведено описание свойств мозга человека, которые требуют глубокого изучения и внедрения их в перспективных образцах разрабатываемых нейроморфных систем. К таким свойствам следует отнести: способность мышления; энергоэкономичность; непрерывный характер взаимодействия с внешней асинхронной средой; масштабируемость; оперативное решение не тривиальных когнитивных задач; разнообразие видов мозга; параллельная обработка разнородной информации.

Показано, что наиболее важным свойством мозга человека является способность мышления. Предложено рассматривать нейроморфные системы как биокиберфизические системы – новый класс информационных социокиберфизических систем, включающих бионическую, кибернетическую и физическую подсистемы. Бионическая подсистема включает модели и механизмы – базис для программ и исполнительных устройств остальных подсистем. Представлена формализованная модель информационных процессов мозга человека, которую целесообразно учитывать в нейроморфных системах.

Ключевые слова: информационные процессы, нейроморфная система, свойства мозга человека, рекуррентная нечеткая нейронная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из передовых современных направлений исследований в области искусственного интеллекта (ИИ) являются нейроморфные вычисления (НВ), прикладным аспектом которых выступает разработка на их основе нейроморфных систем (НМФС) [1].

Основные причины появления НМФС: во-первых, углубленное изучение принципов обработки информации в биологических системах, начиная от мозга и нервной системы простейших и, заканчивая головным мозгом и нервной системой человека, во-вторых, интенсивное и про-

дуктивное изучение спайковых (импульсных) нейронных сетей – одного из классов искусственных нейронных сетей (ИНС) третьего поколения [2,3], наиболее адекватно отражающих информационные процессы, происходящие в биологических системах, в-третьих, желание сделать современные вычислительные средства (микропроцессоры, персональные компьютеры, суперкомпьютеры и др.) более производительными и с низким энергопотреблением.

Анализ литературы [4–8] показывает, что НМФС могут быть определены, как системы обработки информации, базирующиеся на моделях функционирования мозговой деятельности нейробиологических объектов, построенных

на спайковых нейронных сетях, позволяющих эти модели реализовать, в интересах достижения поставленных целей.

Поскольку НМФС являются малоизученными и требуют к себе более внимательного рассмотрения в интересах совершенствования дальнейших теоретических исследований, изготовления более эффективных нейропроцессоров, а также организации учебного процесса в данной предметной области, то данная статья, целью которой является систематизация знаний в области изучения свойств НМФС и происходящих в них информационных процессов, является актуальной в научном, практическом и учебном аспектах.

ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМАТИКА СТАТЬИ

Рассмотрим свойства и информационные процессы, происходящие в наиболее совершенной биологической системе – мозге человека (МЧ).

Самым важным свойством МЧ, лежащим в основе познавательного процесса человека, является способность мышления. Процесс мышления представляет собой динамичное изменение нескольких основных состояний МЧ: ощущения; восприятия; представления. При этом состояния ощущения и восприятия имеют непосредственное отношение к конкретной действительности, а состояние представления связано с ее опосредованным отражением (субъективным представлением человека). Именно состояние представления приводит МЧ к генерации новых идей и получению новых знаний.

Процесс мышления человека может быть определен, как «... процесс отражения наиболее существенных свойств предметов и явлений действительности, а также наиболее существенных связей и отношений между ними, что в конечном итоге приводит к получению нового знания о мире. На основе возникающих ассоциаций между отдельными представлениями, понятиями создаются новые суждения и умозаключения» [9].

Познание данного процесса, его копирование и воспроизведение техническими устройствами будоражит умы исследователей и конструкторов уже много веков. Результаты их деятельности не безуспешны, но весьма далеки от конечного результата – создания точной (максимально адекватной) модели информационного процесса мышления (ТМИПМ). Несмотря на то, что проводимые исследования в данной предметной области внушают оптимизм, тем не менее рассчитывать на получение приемлемого результата в ближайшей перспективе не приходится. Можно считать, что достижение данного результата является долгосрочной стратегической задачей ИИ.

Кроме свойства мышления, МЧ обладает и другими важными свойствами, которые необходимо учитывать при разработке НМФС.

Перечень таких важных свойств МЧ представлен на рис. 1.



Рис. 1. Перечень важных свойств мозга человека

Проведенные эксперименты показали, что МЧ в процессе функционирования потребляет энергии на несколько порядков меньше, чем самые совершенные НМФС. Известно, что значение энергоемкости МЧ лежит в диапазоне 20–30 Вт, а для одного из типов современных суперкомпьютеров – «Кристафари» – представителя НМФС значение данной характеристики составляет около 1 МВт. В этом проявляется первое важное свойство МЧ – энергоэкономичность. Реализация данного свойства применительно к НМФС станет возможной, когда будет построена ТМИПМ.

Вторым важным свойством МЧ является обеспечение им непрерывного взаимодействия человека с внешней асинхронной средой. В данном контексте под асинхронной средой понимается широкий спектр разнородных непрерывных динамических информационных потоков внешней обстановки, окружающих человека. Человек способен их постоянно воспринимать (слышать, видеть, ощущать и др.) и избирательно с ними взаимодействовать (обращать на них внимание), причем сразу с несколькими (например, писать и слушать музыку и др.). Для современных НМФС это пока не достижимо. Лежащие в их основе ИНС, взаимодействуют с внешней средой только по какому-то одному протоколу и весьма жесткому. Обученная ИНС возвращает результат (число, массив, фрейм и др.) по мере того, как она в синхронном режиме преобразует (пересчитывает) свое состояние.

Свойство масштабируемости является третьим важным свойством МЧ. Его суть заключается в том, что человек способен решать сложные когнитивные задачи в условиях ограниченного объема МЧ (числа нейронов и синаптических связей). Несмотря на то, что их много (на один см² ткани МЧ приходится в среднем 10⁶ нейронов и 10¹⁰ синапсов), тем не менее их число ограничено. Механизмы функционирования МЧ при решении задач различного уровня когнитивности и получаемые при этом результаты

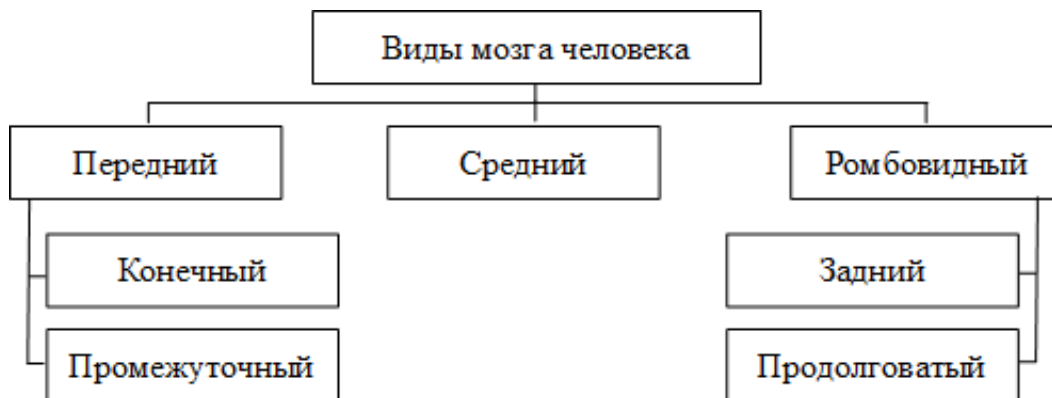


Рис. 1. Разновидности мозга человека

экспериментов в настоящее время отсутствуют. При этом суть гипотез о существовании таких механизмов заключается в следующем: 1) существующие ассоциации нейронов и синаптических связей являются универсальными и способны решать когнитивные задачи различной сложности; 2) решение сложных когнитивных задач локализовано (существуют локации решения простых и сложных задач); 3) в зависимости от степени сложности, возрастает локализация (масштабируемость); 4) существует комбинация этих механизмов. Данные гипотезы нуждаются в проверке, что составит суть следующих исследований. Однако уже сейчас можно сделать вывод о том, что для МЧ в рамках решения сложных когнитивных задач, характерна гибкая масштабируемость. Применительно к решению сложных когнитивных задач с помощью НМФС в настоящее время существует лишь механизм прямого масштабирования, состоящий в наращивании сложности используемых моделей, базирующихся на ИНС. При этом число нейронов в таких ИНС увеличивается до 10^7 , а число синаптических связей возрастает до 10^{12} . В итоге, с использованием даже самых мощных суперкомпьютеров, на обучение такой громоздкой ИНС могут затрачиваться месяцы.

Четвертое важное свойство МЧ – оперативное решение нетривиальных когнитивных задач тесным образом связано с предыдущим свойством – масштабируемостью в части обучения ИНС. Однако имеется еще один момент, имеющий непосредственное отношение к данному свойству. Некоторые люди творческих профессий (ученые, художники и др.) обладают способностью оперативного решения нескольких нетривиальных когнитивных задач, близких по содержанию в рамках некоторой предметной области. При этом время, затрачиваемое на их решение, может исчисляться от нескольких минут до нескольких часов. Для НМФС достичь подобных результатов в настоящее время не представляется возможным. Для решения каждой задачи НМФС должна обучиться или дообучиться путем обработки

определенного множества предварительной информации. Для сбора такой информации и ее упорядочения (формализации для восприятия НМФС) потребуется время. Если к нему добавить временные затраты на обучение (дообучение) НМФС, то о какой-либо приемлемой оперативности речи быть не может. Разница между оперативностью МЧ и НСФС составляет порядки и временной горизонт преодоления этого барьера пока не просматривается.

Разнообразие видов мозга является пятым важным свойством МЧ. Рассматривая строение МЧ с позиций системного подхода, можно утверждать, что в качестве основных элементов в его состав входят около 90 млрд нейронов [10], 300 млрд глиальных клеток [11] и 300 триллионов синаптических связей [12]. На каждый см^2 ткани головного мозга приходится 10^6 нейронов и 10^{10} синапсов [11]. Это колоссальное число элементов распределено между некоторыми подсистемами – видами мозга, которые в схематичном виде представлены на рис. 2.

Передний мозг – наиболее развитая структура (подсистема) МЧ. Он обеспечивает реализацию личностных, поведенческих и психологических функций человека [12]. В его состав входят две подсистемы: конечный и промежуточный мозг. Конечный мозг является самой развитой и наиболее крупной структурой МЧ. На его основе реализуются следующие функции: регуляция движений; условная рефлексия; речь; зрение; обоняние; вкус; слух и др. Промежуточный мозг находится между конечным и средним МЧ. Он обеспечивает реализацию таких функций человека, как нейрогуморальную регуляцию, терморегуляцию, сон, бодрствование и др.

Средний мозг – структура МЧ, которая практически не претерпела эволюционных изменений, начиная от простейших (хордовых) животных и заканчивая человеком. На его основе реализуются такие основные функции, как возбуж-

дение центральной нервной системы, мотивация, ретрансляция зрительных и слуховых импульсов в таламус и др.

Ромбовидный мозг является одним из компонентов центральной нервной системы, обеспечивающий инициализацию и координацию дыхания и кровообращения человека. Данный вид мозга также участвует в реализации вегетативных и соматических рефлексов. В структурном плане он включает задний и продолговатый виды мозга. Основными функциями заднего мозга являются реализация: тактильных ощущений, мимики лица и глазных движений и др. Продолговатый мозг реализует функции дыхания, координации сердечной деятельности; пищеварения и др.

Анализ данного свойства позволяет сделать несколько выводов: во-первых, МЧ может быть представлен в виде совокупности различных мозговых центров, взаимосвязанных между собой для обеспечения жизнедеятельности человека и решения множества других задач; во-вторых, структура МЧ принципиально отличается от конфигурации современных НМФС, что обуславливает необходимость формирования ТМИПМ, внедрение которой позволит существенно приблизить характеристики НМФС к эталонным – характеристикам МЧ.

Шестым важным свойством МЧ является реализация им параллельной обработки разнородной информации. Данное свойство имеет тесное единство со вторым свойством МЧ, при раскрытии сути которого разнородная информация была представлена в виде совокупности непрерывных динамических информационных потоков внешней обстановки, окружающих человека. Он ее воспринимает и соответствующим образом на нее реагирует. Действительно, в процессе ходьбы человек анализирует окружающую обстановку и, в соответствии с ее особенностями, координирует свои движения (изменяет длину шага, прекращает движение и др.). В тоже время человек во время ходьбы может вести с кем-то осмысленную беседу или слушать музыку. Причем он может делать это одновременно (параллельно). К сожалению, современные НМФС, в виду особенности их конфигурации (отсутствии центров параллельной обработки информации), на это не способны. Возможно данное свойство будет реализовано в НМФС в ближайшей перспективе.

Важное значение для разработки НМФС имеет знание информационных процессов, происходящих в МЧ. Другими словами, необходимо понимание того, какие действия с информацией происходят в МЧ. Ранее авторами рассматривались информационные социокиберфизические системы (ИСКФС) [13–15], в которых описывались информационные процессы взаимодействия человека – лица, принимающего решения, с учетом его психологических особенностей, с кибернетическими (программными) и физическими (аппаратными) подсистемами. Однако для изучения НМФС целесообразно рассмотрение нового

класса ИСКФС – биокиберфизических систем (БКФС), включающих бионическую, кибернетическую и физическую подсистемы. Назначение и особенности двух последних подробно изложено в [13].

Бионическая подсистема представляет собой набор моделей и механизмов, лежащих в основе функционирования разрабатываемой БКФС. Причем используемые в ней модели и механизмы построены на принципах функционирования реальных биологических объектов.

В рамках данной статьи НМФС является БКФС, в бионической подсистеме которой используется общая целеполагающая модель информационных процессов МЧ. Физически данная модель представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих объектов (элементов) – мозговых центров, способных манипулировать с информацией (запоминать, обрабатывать, обмениваться и др.) и вырабатывать управляющие воздействия на различные органы человека.

В символьном виде модель представляется следующим образом.

Дано:

1) Внешняя асинхронная среда представлена набором параметров n :

$$Q(t) = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

2) Система МЧ представлена набором параметров m :

$$S(t) = (s_1, s_2, \dots, s_m)$$

3) Система МЧ имеет набор сенсоров разной модальности, на основе которых она, взаимодействуя с внешней асинхронной средой Q , получает наборы сенсорных информационных воздействий следующих видов: визуальных – $V = V(S, Q)$; слуховых – $C = C(S, Q)$; обонятельных – $O = O(S, Q)$; тактильных – $T = T(S, Q)$; вкусовых – $A = A(S, Q)$

4) Система МЧ (мозжечок) генерирует внутреннюю гироскопическую информацию о местоположении тела человека: $G = G(S, Q)$

5) Внутри системы МЧ в непрерывном режиме независимо от воздействия внешней среды происходят следующие информационные процессы: обмен информацией – $I_e = I_e(S)$; хранение информации – $I_x = I_x(S)$; обработка информации – $I_o = I_o(S)$

6) В процессе функционирования система МЧ формирует управляющее воздействие на человека $Y(t)$, $S(t) = S(Y(t))$

7) Цель управления – обеспечить оптимальную траекторию поведения человека (например, ходьба в лесу) с учетом оптимизации критерия

$$K = K(V(t), C(t), O(t), T(t), A(t), G(t), I_g(t), I_x(t), I_o(t))$$

(воспринимать запахи, пение птиц и др).

Требуется найти: функцию управления

$$Y(t) = Y(V, C, O, T, A, G, I_g, I_x, I_o)$$

зависящую от переменных $V, C, O, T, A, G, I_g, I_x, I_o$ $V, C, O, T, A, G, I_g, I_x, I_o$ обеспечивающую движение человека в интересах оптимизации критерия K :

$$K = K(V, C, O, T, A, G, I_g, I_x, I_o) \rightarrow K_{opt}$$

Особенностью данной модели является зависимость сенсорных воздействий на МЧ, от состояний асинхронной среды и самого МЧ. Поскольку исходное состояние среды характеризуется неопределенностью, то определение функции управления в аналитическом виде не представляется возможным, как и реализация поиска решения аналитическим путем. Закон управления может носить нелинейный характер, зависеть от времени и содержать разнородные составляющие (аналоговые и дискретные). Это затрудняет учет ограничений и выбор вида требуемых функциональных преобразований для поиска закона управления. В интересах выбора максимально полного базиса функциональных преобразований для решения столь сложной задачи целесообразно использовать сетевые структуры динамических нейронов [16] вообще или адаптивные резонансные нейронные сети, в частности (например, FuzzyART и др.) [17]. Фрагмент типовой структуры рекуррентной нечеткой нейронной сети приведен на рис. 3.

Поиск решения данной задачи в таком базисе заключается в синтезе конфигурации нейронной сети, способной к реконфигурации ее составных частей во времени, ее обучении и тестировании. Необходимость реконфигурации сети обусловлена динамическим изменением локальных целей системы на отдельных отрезках времени и соответствующим изменением на них ее функциональных возможностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы данной статьи направлены на изучение свойств и информационных процессов МЧ в интересах совершенствования разрабатываемых НМФС – одного из наиболее перспективных направлений ИИ. Приведенные свойства и сформулированная общая целеполагающая модель информационных процессов МЧ не являются окончательными, а являются лишь приглашением к более глубокому и основательному изучению такого сложного и интересного объекта исследования, как МЧ. Тем не менее на основе данных материалов можно сделать несколько важных выводов: во-первых, в настоящее время детальная картина информационных процессов, происходящих в МЧ до конца неизвестна, а лишь обозначены ее контуры; во-вторых, чтобы получить НМФС, которые хотя бы в отдаленной форме приближались по своим возможностям к МЧ, тех знаний и технических решений, которыми обладают исследователи и конструкторы на сегодняшний день в данной предметной области недостаточно; в-третьих, одной из перспективных платформ конструирования НМФС являются сетевые структуры динамических нейронов и их разновидности, например адаптивные резонансные нейронные сети, которые в силу своих конструктивных особенностей способны гибко менять свою структуру на различных временных интервалах в зависимости от локальных целей и, решаемых на их основе, текущих задач.

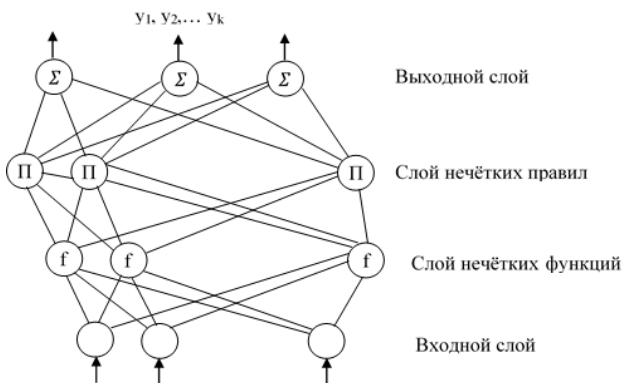


Рис. 3. Фрагмент типовой структуры рекуррентной нечеткой нейронной сети

Список использованных источников и литературы

1. Krichmar, J.L. Neurobiologically Inspired Robotics: Enhanced Autonomy through Neuromorphic Cognition / J.L. Krichmar, J. Conradt, M. Asada // *Neural Networks*. – 2015. – 72. – Pp. 1–2.
2. Ponulak F., Kasiński A. Introduction to spiking neural networks: Information processing, learning and applications // *Acta Neurobiologiae Experimentalis*. 2011. No.71. С. 409–433.
3. Бендерская Е.Н., Никитин К.В. Возможности использования импульсных рекуррентных нейронных сетей для анализа электрокардиограмм // *Информационно-управляющие системы*. 2015. No 1. С. 85–91. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.1.85.
4. Biolková D., Biolková Z., Biolková V. Behavioral modeling of memcapacitor // *Radioengineering*. 2011, Vol. 20, P. 228–233.
5. Li C. B., Li C. D., Huang T. W., Wang, H. Synaptic memcapacitor bridge synapses // *Neurocomputing*. 2013, Vol. 122, P. 370–374.
6. Wang G., Zang X., Wang F., Yuan F., Lu H. H.–C. Memcapacitor model and its application in chaotic oscillator with memristor // *Chaos*. 2017, Vol. 27, P. 013110.
7. Бахшиев А.В. Нейроморфные системы управления на основе модели импульсного нейрона со структурной адаптацией: дис. к.т.н. – СПб., 2016.
8. Ерохин В.В. Органические мемристорные приборы и нейроморфные системы: дис. д.ф.-м.н. – М., 2018.
9. Зефирова Т.Л., Зиятдинова Н.И., Купцова А.М. Физиологические основы мышления. Учебно-методическое пособие. – Казань: КФУ, 2015. – 42 с.
10. Сидоров А.В. Основы клеточной нейробиологии. Учебное пособие. – Минск: БГУ, 2020. – 395 с.
11. Дорогина О.И. Нейрофизиология. Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 100 с.
12. Воронова Н.В., Климова Н.М., Менджерицкий А.М. Анатомия центральной нервной системы. Учебное пособие. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 128 с.
13. Белоусов В.Е., Морозов В.П., Путинцева Е.В., Сырин А.И. Определение и свойства социокиберфизических систем // *Проектное управление в строительстве*. 2020. № 4 (21). С. 90–94.
14. Морозов В.П., Родионов Е.А., Сырин А.И. Конфигурирование информационных социокиберфизических систем управления инвестиционным портфелем // *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2021. № 5 (63). С. 38–43.
15. Морозов В.П., Белоусов В.Е., Сырин А.И. Применение искусственных нейронных сетей для управления инвестиционным портфелем в информационных социокиберфизических системах // *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2022. № 3 (67). С. 32–38.
16. Миркес Е.М. Функциональные модели универсального нейрокомпьютера: дис. д.т.н. – Красноярск, 2000.
17. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры. Учебное пособие. – СПб: ГУАП, 2013. – 284 с.

PROPERTIES AND INFORMATION PROCESSES OF HUMAN BRAIN FOR DEVELOPMENT OF NEUROMORPHIC SYSTEMS

Morozov V.P., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor Voronezh State Technical University

Belousov V.E., Candidate of Technical Sciences, Associate professor, associate professor Voronezh State Technical University

Mistrov L.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of the All-Russian Scientific Center of the VUNC VVS «VVA named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Central Branch of «RGUP», Chief Specialist, Russian Standardization Institute

Syrin A.I., Applicant, Military unit 38953-k

This article is devoted to the analysis of the properties of the human brain and the formation of a model of representation, occurring in it, information processes. This is necessary to improve neuromorphic processors developed within one of the areas of artificial intelligence. It has been shown that neuromorphic processors are representatives of biocyberphysical systems, including bionic, cybernetic and physical subsystems. The leading role among these subsystems is played by the bionic subsystem. It contains special mathematical support (models, mechanisms, algorithms, etc.), which is the basis of the developed software of the cybernetic subsystem and physical actuators. It has been shown that in order to increase the efficiency of the neuromorphic processors being developed, it is advisable to include in the mathematical support of their bionic subsystems models for representing a number of properties of the human brain and the information processes that take place in it.

Among such properties stand out: the ability to think, energy efficiency; continuous interaction with the external asynchronous environment; scalability; operational solution of non-trivial cognitive problems; a variety of brain species; parallel processing of heterogeneous information. None of these properties are fully implemented in neuromorphic processors. The main reasons for this are the difficulty of realizing these properties, their lack of knowledge and the lack of an adequate model for representing information processes occurring in the human brain. A variant of such a model in a formalized form is proposed. To implement it, it is proposed to use adaptive resonance neural networks as the maximum complete basis for functional transformations.

Keywords: information processes, neuromorphic system, properties of the human brain, recurrent fuzzy neural network.

References

1. Krichmar, J.L. Neurobiologically Inspired Robotics: Enhanced Autonomy through Neuromorphic Cognition / J.L. Krichmar, J. Conradt, M. Asada // Neural Networks. – 2015. – 72. – Pp. 1–2.
2. Ponulak F., Kasiński A. Introduction to spiking neural networks: Information processing, learning and applications // Acta Neurobiologiae Experimentalis. 2011. No.71. P. 409–433.
3. Benderskaja E.N., Nikitin K.V. Vozmozhnosti ispol'zovaniya impul'snyh rekurrentnyh nejronnyh setej dlja analiza jelektrokardiogramm // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 2015. No 1. S. 85–91. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.1.85.
4. Biolk D., Biolk Z., Biolkova V. Behavioral modeling of memcapacitor // Radioengineering. 2011, Vol. 20, Pp. 228–233.
5. Li C. B., Li C. D., Huang T. W., Wang, H. Synaptic memcapacitor bridge synapses// Neurocomputing. 2013, Vol. 122, P. 370–374.
6. Wang G., Zang X., Wang F., Yuan F., lu H. H.–C. Memcapacitor model and its application in chaotic oscillator with memristor// Chaos. 2017, Vol. 27, P. 013110.
7. Bahshiev A.V. Nejromorfnye sistemy upravlenija na osnove modeli impul'snogo nejrona so strukturnoj adaptaciej: dis. k.t.n. – Spb., 2016.
8. Erohin V.V. Organicheskie memristornye pribory i nejromorfnye sistemy: dis. d.f-m.n. – M., 2018.

9. Zefirov T.L., Zijatdinova N.I., Kupcova A.M. Fiziologicheskie osnovy myshlenija. Uchebno-metodicheskoe posobie. – Kazan': KFU, 2015. – 42 p.
10. Sidorov A.V. Osnovy kletочноj neyrobiologii. Uchebnoe posobie. – Minsk: BGU, 2020. – 395 p.
11. Dorogina O.I. Nejrоfiziologija. Uchebnoe posobie. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2019. – 100 p.
12. Voronova N.V., Klimova N.M., Mendzherickij A.M. Anatomija central'noj nervnoj sistemy. Uchebnoe posobie. – M.: Aspekt Press, 2005. – 128 p.
13. Belousov V.E., Morozov V.P., Putinceva E.V., Syrin A.I. Opredelenie i svojstva sociokiberfizicheskikh sistem // Proektnoe upravlenie v stroitel'stve. 2020. № 4 (21). Pp. 90–94.
14. Morozov V.P., Rodionov E.A., Syrin A.I. Konfigurirovanie informacionnyh sociokiberfizicheskikh sistem upravlenija investicionnym portfelem // Informacionno–jekonomicheskie aspekty standartizacii i tehničeskogo regulirovanija. 2021. № 5 (63). Pp. 38–43.
15. Morozov V.P., Belousov V.E., Syrin A.I. Primenenie iskusstvennyh neyronnyh setej dlja upravlenija investicionnym portfelem v informacionnyh sociokiberfizicheskikh sistemah // Informacionno–jekonomicheskie aspekty standartizacii i tehničeskogo regulirovanija. 2022. № 3 (67). Pp. 32–38.
16. Mirkes E.M. Funkcional'nye modeli universal'nogo neyrokomp'jutera: dis. d.t.n. – Krasnojarsk, 2000.
17. Burakov M.V. Neyronnye seti i neyrokontrollery. Uchebnoe posobie. – SPb.: GUAP, 2013. – 284 p.