

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
Федерального исследовательского центра
Институт прикладной физики
Российской академии наук

Академик РАН

А.М. Сергеев

«16» января 2017 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу
Александра Валерьевича Бахшиева

«НЕЙРОМОРФНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙРОНА СО СТРУКТУРНОЙ АДАПТАЦИЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В диссертационной работе А.В. Бахшиева представлены результаты исследований таких моделей нейроподобных элементов, архитектур и алгоритмов нейроморфных систем управления, а также путей обработки информации, которые обеспечивают возможность изменения структуры связей элементов систем в процессе их функционирования для адаптации к изменяющимся условиям. Разработаны и продемонстрированы варианты применения специальных программных средств для моделирования предложенных нейроморфных систем с гибкой структурой. В частности, был проведен анализ существующих моделей нейронов с описанием их недостатков, а для их устранения была разработана и исследована новая модель нейрона как элемента нейроморфной системы, позволяющая динамически изменять свою структуру, адаптируясь к появлению новых особенностей во входных данных. Выполнена разработка архитектур и алгоритмов функционирования нейроморфных систем управления на основе такой модели нейрона. Разработаны специальные программные средства моделирования нейроморфных систем с динамически изменяемой структурой. Проведены исследования полученных моделей с целью выявления возможностей повышения функциональных возможностей конструируемых систем за счет структурной адаптации.

Разработка таких искусственных нейронных сетей использующих методы динамической перестройки топологии сети под изменяющиеся условия задачи, включая случаи возможной деградации функциональных возможностей элементов системы, несомненно, относится в настоящее время к очень актуальной тематике.

Важно понимать механизмы и исследовать режимы адаптации, позволяющие системе сохранять свою работоспособность в изменяющихся условиях среды или при определенном виде повреждениях.

Результаты работы А.В. Бахшиева ориентированы на использование их как в исследовательских разработках, так и при конструировании робототехнических систем.

СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы – 176 страниц текста. Список литературы содержит 93 наименования.

Введение содержит обоснование актуальности, описаны объект, предметы и методы исследования. Раскрыта научная новизна и практическая значимость результатов, основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации, реализации и внедрении результатов работы.

В первой главе проведен анализ и описаны основные проблемы, возникающие при разработке нейроморфных систем управления и обработки информации. Приведен обзор существующих моделей нейронов и подходов к управлению движением при помощи нейроморфных систем, предложена их классификация. Дано обоснование актуальности темы работы. Формализована постановка задач исследования и обозначены подходы к решению поставленных задач. С помощью функциональных схем показаны этапы перехода от универсальной модели формального нейрона к модели, позволяющей учитывать древовидную структуру нейронов с возможностью пространственного и временного суммирования сигналов. Затем демонстрируется переход от описания состояния преобразующего элемента одной функцией к множеству функций, которые будут описывать возбуждающие и тормозящие процессы. После этого рассмотрен переход к выбранной автором модели, которая позволяет осуществлять нелинейные аналоговые преобразования дискретных входных сигналов и воспроизводить большое количество особенностей поведения нейронной системы, свойственных более сложным моделям с меньшим числом переменных состояния.

Созданные нейроморфные системы формируются на основе агент ориентированного подхода, в котором нейроморфная система агента синтезируется, основываясь на известных из биологии нейронных структурах и принципах.

Во второй главе приводятся функциональные схемы и математическое описание новой модели нейрона. Разработаны эвристические правила построения структуры нейронной сети на основе предложенной модели нейронов, которые разделены на две группы: правила построения древовидной структуры нейрона и правила организации связей.

Предложена математическая модель импульсного нейрона, являющегося развитием технических нейронов, и основывающаяся на заимствовании некоторых свойств биологического нейрона.

Представлены функциональная схема новой модели, системы дифференциальных уравнений ее функциональных элементов, правила структурной настройки и параметрической настройки (на примере обучения по Хеббу). Одной из особенностей модели является возможность значительно упростить решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений за счет разбиения системы уравнений на несколько систем с независимыми уравнениями, согласованных по начальным и конечным условиям в моменты начала и окончания формирования импульсов фиксированной амплитуды на входах и выходе модели.

Проведена проверка работы модели на синтетических тестах. Также представлены результаты моделирования элементарных биологических нейронных структур. Результаты демонстрируют возможность описывать многие этапы обработки информации, присущие биологическому нейрону, сохраняя при этом качественное соответствие в преобразовании вход-выход.

В третьей главе приводятся функциональные схемы и математическое описание нейроморфных систем на основе разработанной модели нейрона, базирующиеся на известных биологических нейронных структурах.

Предложена архитектура части нейроморфной системы управления поведением роботов, отвечающей за запоминание и воспроизведение паттернов влияния на среду через эффекторы робота и разработаны модели архитектурных элементов этой части нейроморфной системы, основывающиеся на известных из нейрофизиологии нейронных структурах.

Разработана модель уровня регулятора, в основе которого положена нейронная сеть спинального уровня управления мышечными сокращениями.

Разработана модель уровня запоминания состояний объекта управления. В основу этой нейронной сети положены некоторые принципы формирования зрительной коры мозга.

Разработана модель уровня управления движением по траектории, где под траекторией понимается последовательный переход между запомненными состояниями системы. В основу этого уровня проложены кольцевые структуры с положительной обратной связью

В четвертой главе приводится описание специального программного обеспечения для исследования разработанных моделей, пакет соответствующих программ, его отдельные модули и их взаимодействие. Такое программное обеспечение позволяет, в частности, исследовать модели нейронов и нейронных сетей с произвольной и оперативно изменяемой структурой связей. Разработанное ПО внедрено в учебный процесс студентов 4-го и 5-го курсов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертационной работы А.В. Бахшиева от 11.10.2016 г.

Разработаны компьютерные реализации элементов нейрона и нейронных сетей. Специальное программное обеспечение содержит 908 файлов исходного кода, содержащих в себе 168888 строк кода, 589 классов. Компоненты разработанных нейроморфных систем управления и вспомогательные компоненты (источники данных, сбора статистики и т.п.) реализованы в 16 библиотеках компонент.

Разработанное программное обеспечение было использовано и отработано в качестве ядра ряда систем видеоаналитики в ЦНИИ РТК, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертационной работы А.В. Бахшиева от 01.06.2016 г. Результаты диссертационной работы были использованы для создания систем технического зрения, в частности, системы интеллектуального видеонаблюдения, системы технического зрения мобильного робота, системы определения пространственной ориентации космических кораблей в ходе сближения и стыковки с МКС, системы технического зрения универсального спасательного средства.

Разработанные программные средства имеют следующие достоинства: кроссплатформенное ядро, позволяющее создавать приложения для любых систем, поддерживающих стандарт С++ и имеющих реализацию библиотеки boost; быстрое создание новых алгоритмических решений на базе уже созданных библиотек компонент, и, как следствие, простота создания средств тестирования отдельных алгоритмов и комплексного тестирования; унификация описания входов, выходов, параметров и переменных состояния каждого алгоритма; пользовательский интерфейс, позволяющий проводить мониторинг и управление разрабатываемой системой; и другие возможности.

В пятой главе приведены результаты исследований модели нейрона, а также предложенных нейроморфных систем, с целью оптимизации параметров нейрона (нейроморфных систем) и методов их настройки.

Выполненные исследования показывают эффективность применения предложенных биоподобных нейронных структур для решения задач управления техническими системами. Показано, что при смене задачи и объекта управления не требовалась настройка параметров нейронов системы управления. Адаптация системы к желаемым характеристикам поведения осуществлялась с помощью простых правил структурной перестройки нейронной сети.

Сформулирован ряд направлений развития систем управления поведением роботов на основе биоподобных нейронных сетей.

В заключении еще раз обобщаются все результаты предыдущих глав, формулированы главные результаты диссертации.

Таким образом, для достижения поставленной в диссертации цели были разработаны модели, позволяющие реализовать уникальные структурные адаптационные возможности искусственных нейронных сетей. Такие модели позволяют также синтезировать нейроморфные системы, основываясь на известных биологических нейронных структурах и принципах их формирования в живой природе.

НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среди полученных **научных результатов** выделяются следующие:

1. Новая модель нейрона со структурной адаптацией как элемента нейроморфной системы, описывающая процессы аналогового преобразования импульсных потоков, в которой представляется объектом с произвольной древовидной структурой своих связывающих и преобразующих элементов, которые могут быть сформированы во время работы системы, как адаптивная реакция на появление сигналов нового функционального назначения. Модель не требует настройки внутренних параметров в процессе функционирования, все изменения функциональности определяются модификацией структурной организации связывающих и преобразующих элементов.

2. Разработана новая иерархическая архитектура нейроморфных систем. Структура сетей, входящих в нее, позволяет изменять как число входных, так и число выходных векторов данных (контекстов), а также число обобщающих слоев, что позволяет динамически расширять число возможных выходных контекстов в которых функционирует нейронная сеть.

3. Предложены новые алгоритмы структурной адаптации нейроморфных систем к появлению новых классов (объектов) во входных данных и выходных контекстов на основе изменения внутренней структуры связывающих и преобразующих элементов

нейронов. Новизна состоит в том, что адаптивные свойства модели нейрона основаны не на изменении параметров модели (например, весов связей), а на изменении структуры, каждый элемент которой представляет собой динамический объект, обеспечивающий обработку сигналов одного функционального назначения. Таким образом, функциональным элементом нейронной сети становится не нейрон, а участок связывающих и преобразующих элементов нейрона, на котором осуществляется пространственная и временная суммация сигналов.

4. Разработан программный комплекс, позволяющий моделировать нейроморфные системы с динамически изменяемой структурой, а также создавать и исследовать поведение иных сложных систем с изменяемой структурой, функционирующих в реальном масштабе времени. В составе комплекса разработаны наборы компонент, реализующие новые модели нейронов и элементы нейроморфных систем управления.

ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

Для науки особый интерес представляет новая модель искусственного нейрона со структурной адаптацией как элемента нейроморфной системы, обеспечивающая возможность динамического изменения древовидной структуры связывающих и преобразующих элементов нейрона. Предлагаемая модель нейрона позволяет исследовать структурные особенности биологических нейронных сетей и описывать их динамические свойства, что в свою очередь позволяет строить модели таких сетей и исследовать возможности их применения при создании биологически инспирированных систем, решающих технические задачи. Основные теоретические положения и практические результаты диссертационной работы А.В. Бахшиева были использованы при разработке разделов дисциплин магистерской программы по направлению 09.04.02 «Интеллектуальные системы и технологии» по профилю 09.04.02_04 «Системный анализ и оптимизация информационных систем и технологий», реализуемой на кафедре 35/02 «Системный анализ и управление» ИКНТ СПбПУ (акт внедрения от 11.10.2016 г.).

В качестве особых достижений хочется отметить, что разработанная А.В.Бахшиевым программная реализация модели нейрона обладает высокой способностью к интеграции в сторонние приложения благодаря грамотно организованной системе конфигурирования, что позволило с легкостью встроить ее в симулятор обработки сигналов в кортикальных структурах (проект "Разработка технологий для репрезентации функций кортикальных структур *in silico*", <http://www.awp.appl.sci-nnov.ru>).

Высокую практическую ценность имеют как алгоритмы, так и, особенно, специальные программные средства для создания нейроморфных систем управления, которые позволяют проводить исследование предложенных моделей и архитектур. Такие программные средства могут быть использованы также для создания систем

технического зрения и обработки информации с эффективной по производительности унифицированной архитектурой, что позволит повысить скорость разработки систем, увеличить надежность, повысить эффективность повторного использования кода, значительно упростить сопровождение и дальнейшее развитие функциональности систем. Так, предложенные в диссертационной работе Бахшиева А.В. алгоритмы были использованы для разработки и последующего внедрения в НОЦ «Транспорт» НГТУ им. Р.А. Алексеева системы технического зрения для транспортно-манипуляционной системы (ТМС), что подтверждено актом внедрения № 19.01.09(НОЦ)/47 от 19.09.2016 года.

Кроме того, разработанные программные средства были использованы для создания систем видеоаналитики в ЦНИИ РТК, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертационной работы А.В. Бахшиева от 01.06.2016 г.

Представленный материал работы понятен, изложение подкреплено необходимым иллюстративным материалом. Сделанные выводы и рекомендации, а также научные положения в рамках сформулированного в диссертации подхода представляются вполне **достоверными** и в достаточной степени **обоснованными**.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

При прочтении некоторых разделов диссертационной работы требуются дополнительные пояснения, например:

1) Как будет вести себя в экспериментальных ситуациях предложенная автором система управления (разделы 5.3-5.6), если характеристики силовых элементов (мышцы, моторы, ...) в двух(много)звенном манипуляторе сильно различаются?

2) Насколько траектории движения в таком манипуляторе стабильны при повторных экспериментах для используемых моделей управления? Известно, что в биологических прототипах траектории движений не повторяются.

3) Почему в диссертации не приведены акты внедрения результатов диссертационной работы и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (например, в приложениях)?

Указанные замечания не влияют на окончательное понимание сути проделанной работы и научно - практической ценности представленных в диссертации результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация написана ясным и понятным языком, хорошо иллюстрирована, содержит большое количество экспериментальных данных. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в Web of Science/Scopus. Результаты работы соответствуют пунктам 4 и 5 паспорта специальности 05.13.01. Автореферат правильно отражает содержание и результаты диссертации. Диссертационная работа

Александра Валерьевича Бахшиева представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой получены новые теоретические и практические результаты. Диссертация соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Александр Валерьевич Бахшиев, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки).

Отзыв составлен сотрудниками лаборатории автоволновых процессов: В.Г.Яхно, О.В.Шемагиной. Отзыв заслушан и одобрен на заседании семинара "Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях" «20» декабря 2016, протокол № 26.

Зав. лабораторией
автоволновых процессов ИПФ РАН,
доктор физико-математических наук,
603950, Россия, г. Н. Новгород, ГСП-120,
ул. Ульянова, д.46 Тел.: 7(831)446-85-80; email: yakhno@appl.sci-nnov.ru

Яхно Владимир Григорьевич

Научный сотрудник ИПФ РАН,
кандидат технических наук,

Шемагина Ольга Владимировна

Подписи В.Г. Яхно, О.В.Шемагиной заверяю:
Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

И.В. Корюкин

Ведущая организация по кандидатской диссертации Бахшиева Александра Валерьевича на тему "Нейроморфные системы управления на основе модели импульсного нейрона со структурной адаптацией"

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
Россия, 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46.
Телефон: + 7(831) 416-46-27. Электронная почта: glyavin@appl.sci-nnov.ru
<http://www.iapras.ru/>

Публикации по теме диссертации **Бахшиева А.В.** за последние 5 лет:

1. Poleyaya S.A., Kovalshuk A.V., Parin S.B., Yakhno V.G. , Relations between endogenous state of physiological system and conscious perception. International Journal of Psychophysiology. – 2010. – Vol. 77. – N 3. – P. 284-285.
2. Беллюстин Н.С., Калафати Ю.Д., Ковальчук А.В., Тельных А.А., Шемагина О.В., Яхно В.Г. Системы обнаружения, сопровождения и кластеризации объектов на основе нейроноподобного кодирования. «Информационно-измерительные и управляющие системы», издательство «Радиотехника», №2, т.8, 2010г., с. 29-34.
3. Яхно В.Г., Модели «адаптивных распознающих ячеек» для формализованного описания психологических реакций человека. «Нейрокомпьютеры: разработка, применение», №2, Стр. 11-16, 2010 г.
4. Яхно В.Г., Основные динамические режимы осознания сенсорных сигналов в нейроноподобных базовых моделях. Проблемы на пути к «нейроморфному» интеллекту. Изв. вузов. Прикладная Нелинейная Динамика. 2011. Т. 19, № 6, С. 130-144.
5. В. Г. Яхно, С. А. Полевая, С. Б. Парин, Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов, Когнитивные исследования: Сборник научных трудов: Вып. 4 / Под ред. Ю. И. Александрова, В. Д. Соловьева. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. – 304 с., стр. 273- 301
6. N.Bellustin, Y. Kalafati, Kovalchuck, A. Telnykh, O. Shemagina, V.Yakhno, Abhishek Vaish, Pinki Sharma, Shirshu Verma, Instant Human Face Attributes Recognition System, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Special Issue on Artificial Intelligence, 2011, p112-120.
7. В. Г. Яхно, Способны ли мы понимать друг друга? О механизмах "когнитивной слепоты", XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2012»: Лекции по нейроинформатике. Издательство МИФИ, 2012, 103-128.
8. Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Яхно В.Г., Универсальная схема взаимодействия нейронных модулей для функционального моделирования процессов обработки информации. , Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013 – №4, стр. 21-27, ISSN 2306-174X
9. Шемагина О.В., Беллюстин Н.С., Калафати Ю.Д., Тельных А.А. «Применение алгоритмов адаптивной сегментации и семантического описания изображений в задаче распознавания «изображений для взрослых» «Информационно-измерительные и управляющие системы», издательство «Радиотехника» №7, 2013г, с.37-42
10. Г.Д.Кузнецова, И.В.Нуйдель, М.Е.Соколов, В.Г.Яхно, Моделирование динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях, Нейроинформатика-2014. Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2014, стр. 150-178.
11. N. S. Belliustin, Yu. D. Kalafati, A. Telnykh, O.Shemagina Neuron-like algorithms of adaptive segmentation and semantic description of images in the “adult image” recognition problem //Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), №1, Vol. 23, 2014г, pp. 26-33
12. Яхно В.Г., Макаренко Н.Г., Поможет ли нам создание "Цифрового двойника человека" лучше понимать друг друга?, В книге "Подходы к моделированию мышления" Под ред. Редько В.Г., Москва: УРСС Эдиториал, 2014, стр. 173-208