

А. П. АНТОНОВ, В. С. ЗАБОРОВСКИЙ  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

В. А. ПОЛЯНСКИЙ  
Институт Проблем Машиноведения, РАН, Санкт-Петербург

## НЕЙРОВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ: АСПЕКТЫ ВЫЧИСЛИМОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ

*Let's not argue – let's do the math.*

*J. L. Lagrange*

*Тезис футуролога А. Кларка о том, что «достаточно развитые технологии неотличимы от магии», актуален в настоящее время как никогда. Современная наука, в отличие от магии, хотя и опирается на логически непротиворечивые физические теории, формализмы математики и возможности вычислительной техники, не сделала мир менее загадочным, особенно в том, что касается природных феноменов сознания, мышления и интеллекта. С точки зрения компьютерных наук, отличительной особенностью этих явлений является их сетцентрическая нейроморфная организация и наличие ресурсов сложноорганизованной памяти – неказуального вычислительного механизма «транспортной» во времени обрабатываемых данных, результатов вычислений и информационных взаимодействий. Формализация этих особенностей позволяет определить модель когнитивных процессов на многомерном множестве состояний, на котором вводится строгое отношение временного порядка и числового равенства, поэтому для вычислений может одновременно использоваться контекстно значимая информация, как о прошлых, так и текущих или прогнозных состояниях. Для систем управления, функционирующих в условиях неопределенности, предложена распределенная гетерогенная реконфигурируемая структура, реализующая технологию «вычисления в памяти» как для алгоритмов, отражающих причинно-следственные отношения, так и процессы обучения, требующие оперативной реконфигурации поля вычислений.*

**Введение.** Доклад посвящен формализации описания когнитивного опыта в контексте задач управления на основе анализа свойств вычислимости когнитивных функций «ограниченной рациональности», представленных операцией свертки сигналов, полученных в разные моменты времени, у которых в качестве временного аргумента используется не строго упорядоченная «стрелой времени» последовательность прошлых, настоящий и будущих состояний, а трехмерное подпространство времени, целостность которого основана на неказуальном влиянии прогнозируемого «будущего» на решения, принимаемые в «настоящем». Аналогичный феномен, получивший название ретропричинности, был описан в квантовой физике [1, 2] на основе эффекта квантовой нелокальности, который имеет подчеркнuto информационный характер. Современные подходы к компьютерному моделированию функций сознания много лет развиваются в рамках направления известного как Computational theory of cognition [3, 4], суть которого в создании вычислительных машин, способных решать различные умственные задачи, такие как рассуждение, распознавание ситуаций, адаптация на основе обучения и т. д. Однако, до сих пор даже относительно низкоуровневые естественные когнитивные процессы, например, такие как восприятие, значительно превосходят возможности современных компьютерных систем. Проблема, которая ограничивает возможности создания «умных компьютеров» носит фундаментальный характер и имеет в своей основе неопределенность обрабатываемых данных. Хорошо известные способы принятия решений в условиях неопределенности базируются на байесовском подходе – стандартной математической модели вывода, которая основана на понятии вероятности и строгой эквивалентности (равенстве) событий на основе их статистической характеристики. Вероятностный подход, однако, ограничивает возможности моделирования многих реалистичных сценариев, основанных на причинно-следственных (казуальных) моделях событиях. Очевидно, формализация когнитивных функций требует более тонких подходов, связывающих между собой идеи математики, компьютерных и нейронаук на основе использования различных отношений эквивалентности, которые отличаются количеством

информации, используемой в процессе вычислений состояний процессов или объектов. Учитывая, что архитектура современных компьютеров разработана для моделирования физических процессов, имеющих казуальную природу и, поэтому, описываемых дифференциальными уравнениями. В результате компьютерное моделирование сводится, либо «цифровому» решению задачи Коши на основе априорно заданных алгоритмов и начальных условий, либо решению задачи на собственные значения. Сложность же компьютерного моделирования когнитивных процессов в том, что характерное для них несущее множество состояний не наделено строгим отношением временного порядка, отражающим их казуальную связанность, поэтому с точки зрения теории вычислений данные о прошлых, текущих и прогнозируемых будущих событиях должны быть одновременно доступны для алгоритмической обработки. Обсуждаемые в докладе подходы базируются на методах теории категорий, в которых множество обрабатываемых событий характеризуется как набором метаданных, так и описанием способов сопоставления одного объекта рассматриваемой категории другому, включая дескрипторы, по которым объекты категории считаются эквивалентными. В докладе анализируется возможность использования категории топос [3] в качестве основы архитектуры гетерогенного реконфигурируемого компьютера, реализующего когнитивные функции с помощью алгоритмов вычислений, управляемых данными и учета временной связанности результатов вычислений относительно отношения их эквивалентности с данными, хранящимися в памяти.

**Содержание.** Описание любой системы как некоего «компьютера» настоятельно предполагает, что система программируема, т. е. реализует заданную последовательность команд обработки данных, суть которых вычисление некоторой функции, однозначно связывающей знаком равенства значения входных и выходных переменных. С этой особенностью связано понятие вычислимости, которое требует существования алгоритма, достигающего указанного выше точного равенства за конечно число шагов. Однако, при использовании цифрового представления данных точность из формального математического понятия «равенства» параметризуется и зависит от числа разрядов представления обрабатываемых чисел. Поэтому характеристика когнитивных функций с точки зрения теории программных автоматов позволяет при рассмотрении свойств вычислимости перейти с «неподвижных брусках знака равенства» [4] на отношение эквивалентности, вводимое в рамках теории категорий.

**Формулировка задачи.** Хотя когнитивные функции сознания до сих пор не является физическим понятием, т. е. частью физических теорий, подобно силе, массе или электрическому заряду, но такую функцию можно представить как сигнал [3], объединяющий данные, различимые дескрипторами прошлое, настоящее и будущее. Фактически это значит, что информация в рамках когнитивного описания пространства событий может передаваться не только физическими сигналами, но и форме процесса, реализующего различные функции на основе памяти и предсказательных расчетов. При этом следует учесть фундаментальные ограничения теории алгоритмов – перечислимость, вычислимость и разрешимость множеств, а также следствия теорем Геделя, применимые к задачам моделирования когнитивных функций и совершенствования систем ИИ. Очевидно, что вместо прямого моделирования «электрофизиологических» процессов, наблюдаемых в головном мозгу, можно использовать и другие виды процессов организации памяти и вычислений, которые сочетают в себе с одной стороны цифровые и непрерывные, а с другой – детерминированные и вероятностные характеристики когнитивных процессов. Для этого определим когнитивную функцию в момент времени  $t$ , через атрибут, которой определяет объем памяти, используемый для хранения информации о прошлых и прогнозируемых событиях. Такую функцию можно формально представить как «сигнал», подверженный свертке с функцией Дирака. Такой сенсорно-поточковый сигнал, отражает не только пространственно-временную связанность воспринимаемых событий, но и наделяет их определенными ментальными атрибутами, позволяя вычислять на многомерном множестве обрабатываемых данных различные отношения эквивалентности. Вычислительная структура, реализующая поток исполнения (control flow) из потока данных (data flow), является моделью исполнительного механизма вычислений, способного из описания событий получить представление когнитивного «сигнала», представлена на рисунке.

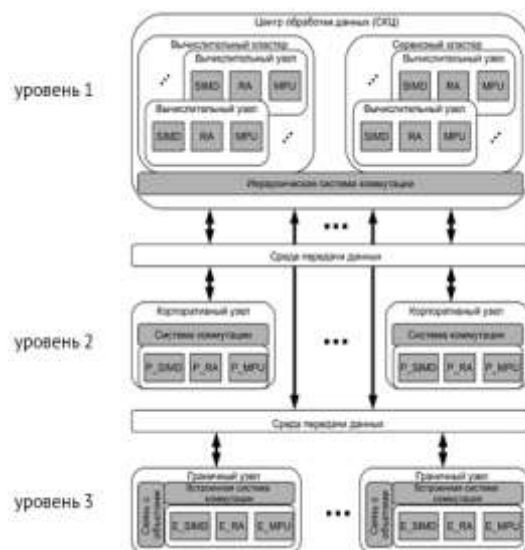


Рисунок. Архитектура гетерогенной вычислительной платформы моделирования когнитивных функций

На рисунке: Уровень 1 «system» – действие «Надо». Аналог неокортекса, реализация функции «социального поведения». Назначение – интерпретация результатов вычислений и решение «обратных» задач синтеза алгоритмов в режиме justintime или плану.

Уровень 2 «premises» – действие «Хочу». Аналог лимбической системы, реализация функции «инстинктивно/рефлексивного» поведения. Назначение – оптимизация спецификаций поля вычислений и форматов данных, «подготовка прошивок» для конфигурации ПЛИС, контроль адекватности цифровых моделей.

Уровень 3 «edge» – Сенсорная среда обработки данных. Назначение – доступ к «пространству» больших данных, доставляемых сенсорами и используемых для «извлечения» мультимодальных данных.

На всех уровнях платформы каждый из гетерогенных вычислительных узлов класса SIMD (ускорители), MPU (MIMD процессоры) и RA(ПЛИС) используют гиперконвергентные ресурсы памяти, сгруппированные в ассоциативную категорию данных, относящихся к прошлым, текущим и прогнозируемым значениям.

**Заключение.** С точки зрения нейрофизиологии когнитивные функции обрабатывает не только оперативную информацию, полученную от органов чувств, но и данные основанные на прошлом опыте и сохраненные в памяти, а также результаты прогноза последствий еще не реализованных управляющих воздействий. Поэтому в пространстве состояний когнитивных функций нет характерной для физических процессов линейной упорядоченности отсчетов времени событий, что наделяет это пространство нетривиальной топологией, которая нашла отражение в архитектуре предложенной платформы. Констеляция данных, основанная на различных отношениях эквивалентности, хранящихся в памяти данных, информации, полученной по каналам связи и с помощью прогнозирования последствий реализованных «сейчас» действий, составляет основу предложенного подхода к компьютерному моделированию когнитивных функций. Конвергентная память, рассматриваемая как многомерный атрибут процессов управления, позволяет моделировать два класса когнитивных процессов – казуально связанных событий, образующих причинно-временную последовательность, в которой прошлые события влияют на настоящее и будущее, а также событий, образующих семантически связанные структуры, в которых потенциальное возможное будущее влияет на управляющие воздействия, принимаемые в настоящий момент времени и изменяет интерпретацию прошлых событий с точки зрения достигнутых результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Miller P., 2018, An Introductory Course in Computational Neuroscience, Cambridge, MA: MIT Press.
2. Kriegesgorte K. and Douglas P., 2018, "Cognitive Computational Neuroscience", Nature Neuroscience, 21: 1148–1160.

3. Kalyaev Igor &Antonov Alexander &Zaborovsky Vladimir. (2019). Architecture of Reconfigurable Heterogeneous Distributed Supercomputer System for Solving Problems of Intelligent Data Processing in the Era of Digital Transformation of the Economy. *Voprosy kiber bezopasnosti*. 2-11. 10.21681/2311-3456-2019-5-02-11.
4. Antonov A., Besedin D., and Filippov A., "Research of the Efficiency of High-Level Synthesis Tool for FPGA Based Hardware Implementation of Some Basic Algorithms for the Big Data Analysis and Management Tasks", in *Proceedings of the FRUCT'26*, pp. 23-29, April 2020.

*Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта №18-2903250 МК "Робастные методы синтеза интеллектуальных транспортных систем киберфизических объектов коалиции на основе Байесовской концепции вероятности и модальной логики".*

A.P. Antonov, V.S. Zaborovsky, (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg),  
V.A. Polyansky, (Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg)

### **Neural Calculations in Control Tasks: Aspects of Computability and Spatio-temporal Characterization of Cognitive Functions**

The thesis of the futurologist A. Clark that "sufficiently developed technologies are indistinguishable from magic" is currently more relevant than ever. Modern science, in contrast to magic, although it relies on logically consistent physical theories, formalisms of mathematics and the possibilities of computing technology, has not made the world less mysterious, especially with regard to natural phenomena of consciousness, thinking and intellect. From the point of view of computer science, a distinctive feature of these phenomena is their network-centric neuromorphic organization and the availability of resources of complex memory – a non-casual computing mechanism for "transporting" the processed data in time, the results of calculations and information interactions. The formalization of these features makes it possible to define a model of cognitive processes on a multidimensional set of states, on which a strict relation between the time order and numerical equality is not introduced, therefore, contextually significant information, both about past and current or predicted states, can be simultaneously used for calculations. For control systems operating under uncertainty, a distributed heterogeneous reconfigurable structure is proposed that implements the technology of "computation in memory" both for algorithms reflecting cause-effect relationships and learning processes that require prompt reconfiguration of the computational field.