

УДК 62.506.222.001

**Степанов С.С.**

Днепропетровский госуниверситет, кафедра квантовой макрофизики

**Степанова Н.И.**

Днепропетровский госуниверситет, кафедра компьютерных технологий

## Тьюринг – 50 лет спустя

A comparative analysis has been performed dealing with the technical parameters of human brain and computer as systems realizing intellectual processes. A number of general questions have been raised that are related to the human and inorganic matter evolution.

В работе проводится сравнительный анализ технических параметров мозга и компьютера как систем, реализующих интеллектуальные процессы. Поднимаются вопросы общего плана, связанные с эволюцией неорганической материи и человека.

**Сможет ли человек мыслить?**

*Антитьюринг*

### Введение

*Я уверен, что лет через пятьдесят станет возможным программировать работу машин с емкостью памяти около  $10^9$  так, чтобы они могли играть в имитацию настолько успешно, что шансы среднего человека установить присутствие машины через пять минут после того, как он начнет задавать вопросы, не поднялись бы выше 70%. [1].* В этом году исполняется 50 лет со дня выхода статьи Тьюринга «*Может ли машина мыслить?*», которая знаменовала собой начало эпохи построения систем искусственного интеллекта (ИИ). Отпущенный прогнозом Тьюринга срок истекает, поэтому интересно оценить степень готовности технической и информационной базы для создания полноценного ИИ.

В этой работе мы хотим провести сравнительный анализ основных параметров мозга человека и компьютера, тенденций в программировании искусственного интеллекта. В первых двух разделах мы даем краткую характеристику систем – носителей естественного и искусственного интеллектов. Далее проводится их сравнительный анализ по трем основным параметрам: 1) память; 2) быстродействие; 3) алгоритм. В заключение мы затрагиваем некоторые проблемы философского плана, связанные с эволюцией человека как биологического вида. Данная статья не претендует на глубину анализа и носит скорее публицистический характер. Однако мы надеемся, что отдельные ее положения могут быть интересны читателю.

## Что мы знаем и не знаем о мозге?

Мозг человека состоит из  $10^{11}$ – $10^{12}$  **нейронов**. Сетевая структура мозга очень сложна. Нейрон может быть связан как с несколькими ближайшими соседями, так и с тысячами других клеток. В дальнейших рассуждениях мы примем среднее число синапсов в расчете на один нейрон равным 500. Нейронная структура в основном зафиксирована на генетическом уровне. После завершения формирования мозга нейроны перестают делиться, меняются лишь связи между ними и параметры синапсов.

«Простая» модель [2] функционирования нейронной сети мозга постоянно уточняется. Так, в нейроне на молекулярном уровне могут происходить достаточно сложные «вычислительные» процессы, отличные от простого аналогового суммирования. Например, показано, что воздействия синапсов, расположенных ближе к телу нейрона, имеют больший вес при возбуждении нейрона, чем воздействия удаленных синапсов [3]. В последние годы обнаружено, что дендриты не являются пассивными отростками нервной клетки. Т.е. клетка может возбуждаться локально в области синапса, а это приводит к тому, что нейрон может иметь не только возбужденное или заторможенное состояние, но и семейство промежуточных состояний. В недавнем обзоре [4] утверждается, что для возбуждения нейрона важна также временная форма нейронного импульса, которая переносит около 300 бит в секунду. Таким образом, нейрон постепенно из «транзистора» превращается в «микросхему»...

Нейробиологи достаточно точно знают, какие разделы мозга обрабатывают зрительную, слуховую, моторную и прочую информацию. Однако нам неизвестны участки мозга, ответственные, например, за хранение долговременной памяти и сознание. Согласно современным представлениям [5], память реализуется как множество аттракторов, возникающих в нейронной сети мозга. По всей видимости, высшие формы интеллектуальной деятельности являются **процессами**, охватывающими **весь** мозг.

## Какие мы имеем компьютеры?

Появление и развитие компьютеров – **принципиально новый этап** развития Человечества и Природы. Дело не в их полезности (паровоз был не менее полезен), а в том, что впервые руками человека Природа создала неорганические объекты, по своей сложности (числу возможных состояний и реакций на внешний мир) приближающиеся к живым существам. Более того, по всей видимости, наступит момент, когда неорганика станет сложнее человека.

Первые компьютеры появились лет шестьдесят назад. За ничтожный по масштабам Природы срок они увеличили свою память, быстродействие и уменьшили размеры на много порядков. Такие темпы никогда не реализовывались в живой природе. В 1950г. Тьюринг оценивал число состояний вычис-

лительной машины в  $2^{16500}$  (20 kb), что было в миллион раз меньше, чем число состояний нейронов мозга [6]. Всего за 50 лет мы прошли эти шесть порядков структурного усложнения! Примечательно также и то, что Тьюринг правильно численно оценил темпы этой эволюции.

Первый процессор компании Intel (1971) имел тактовую частоту 108 кГц. Спустя 19 лет мы имеем в серийном производстве процессоры более 1ГГц, то есть эволюцию быстродействия более, чем на четыре порядка! Сегодня рядовая персональная машина имеет процессор 600 МГц ( $6 \times 10^8$  операций в секунду), оперативную память порядка 64 Mb и дисковую 15 Gb. Она способна выполнять порядка  $10^8$  флопов (операций с плавающей точкой) в сек., имеет скорость работы с оперативной памятью около 300 Мб/сек. и с дисковой около 30 Мб/сек.

Производительность суперкомпьютера превышает производительность персонального на 4-5 порядков. В конце июня компания IBM анонсировала самый мощный на сегодняшний момент суперкомпьютер ASCI White с быстродействием  $1.2 \times 10^{13}$  флопов, что в 1000 раз быстрее, чем его «шахматный предшественник» Deep Blue (1997). Рост производительности на три порядка за три года! «Серийный» суперкомпьютер имеет в настоящее время быстродействие порядка  $10^{12}$  флопов.

Безусловно, современные темпы роста производительности компьютеров могут замедлиться. Существуют физические ограничения на повышение плотности транзисторов. Однако существуют также значительные резервы, связанные с новыми технологиями, такими, как оптическая память, квантовые компьютеры и многое другое. Возможности повышения производительности дают и многопроцессорные системы. Таким образом, сложность компьютерных систем непрерывно (экспоненциально?) возрастает, и в ближайшее время мы можем стать свидетелями превращения количества в качество – появления образований, которые окажутся **(вместе с их информационным наполнением)** сложнее человеческого мозга.

## Память

К оценке емкости мозга можно подходить с разных сторон. Хорошо известен комбинаторный подход. Будем понимать под максимальной емкостью памяти мозга число его возможных возбужденных состояний. Предположим, что каждый нейрон можно кодировать 4-мя байтами. Т.е. мы различаем  $2^{32} = 4 \times 10^9$  различных состояний возбуждения нейрона. Для кодирования  $5 \times 10^{11}$  нейронов необходимо соответственно  $2 \times 10^{12}$  байт = 2 Тб. Это и будет оценкой верхней границы объема памяти мозга человека. Подчеркнем, что эта оценка подразумевает верхнюю границу памяти мозга, а не компьютера, который сможет его моделировать. Так, при моделировании мозга методами нейронных сетей памяти потребуется заметно больше. Нам необходимо хранить параметры каждого синапса и указатель на нейрон, от которого пришел сигнал,

т.е. на каждый нейрон приходится  $(4+5)*500$  байт. Таким образом, для моделирования мозга **методами** нейронных сетей необходимо около  $5 \times 10^{14}$  байт = 500 Тб, т.е. на два порядка больше.

Реальная емкость памяти мозга, по-видимому, значительно меньше верхней границы в 2 Тб. Это связано со следующими причинами. Во-первых, не все возможные состояния возбуждения нервных клеток имеют «физический» смысл. Так, состояние, в котором возбужден один нейрон, а остальные заторможены, вряд ли соответствует реальному состоянию мозга. Если говорить на языке аттракторов, для их возникновения необходимо соблюдение принципа минимальности энергии. Это требование значительно понижает число возможных состояний мозга. Во-вторых, каждый нейрон является сложной и чувствительной системой, функционирование которой зависит от притока крови, состояния окружающих глиальных клеток и многого другого. Т.е., его состояние, в отличие от байта памяти компьютера, не очень воспроизводимо. Поэтому в мозге, по-видимому, предусмотрена система многократного дублирования хранения информации. Наконец, мозг функционирует **локально**. Изменение состояния нейрона обычно ведет к изменению состояний только ближайших к нему нейронов. Мы не можем сразу обратиться к произвольной «ячейке» памяти. Для этого необходим целый каскад возбуждений различных нейронов.

Можно подойти к проблеме оценки емкости мозга с другой стороны. К 50-ти годам в жизни человека проходит около  $10^9$  секунд. Представим, что мы способны на протяжении этого периода ежесекундно, без перерывов на еду и сон, сохранять в **долговременной памяти** без потерь по одному пятибуквенному слову. Если для каждого слова требуется около 3-х байт ( $=5*5/8$ ), то 50-летний естественный интеллект заполнит свою память примерно на 3Gb. Т.е., несмотря на фантастическую для человека интенсивность запоминания, получается довольно скромный результат. Естественно, мы воспринимаем информацию по различным каналам (зрительному, тактильному и др.), каждый из которых обладает своей информационной насыщенностью и степенью сохранения в долговременной памяти. Существуют работы психологов по непосредственному экспериментальному определению емкости долговременной памяти человека [7]. Эти эксперименты говорят о том, что способность человека к долговременному запоминанию различной информации (текстовой, графической, понятийной и т.п.) определяется примерно 2 битами в секунду.

Таким образом, оценка Тьюринга емкости человеческой памяти в  $10^{10}$  бит = 1Gb достаточно близка к реальности. Возможно, эту цифру необходимо увеличить примерно на порядок. Это вполне реализуемо даже на уровне оперативной памяти современных персональных компьютеров, не говоря уже о дисковой памяти. Даже верхняя граница в 2 Тб вполне реалистична для реализации. Подчеркнем еще раз, что речь идет не о количестве памяти, необходимой компьютеру для моделирования мозга, а о сравнении потенциальных возможностей мозга и компьютера сохранять информацию без учета способов и эффективности реализации такого хранения.

## Быстродействие

Быстродействие мозга или компьютера определяется, в конечном счете, временем их реакции на те или иные воздействия. Не зная алгоритма, по которому реализуется эта реакция, сложно сравнивать их быстродействие. Калькулятор способен на невероятное, в сравнении с мозгом, быстродействие. К тому же, быстродействие не является ключевым параметром. Тугодум ИИ или нет – неважно с принципиальной точки зрения, хотя несомненно важно с точки зрения практической.

Один из подходов к оценке быстродействия мозга основан на анализе быстродействия сетчатки глаза [8]. Детали работы сетчатки нейрофизиологам известны значительно лучше, чем детали работы мозга в целом. Оценки показывают, что  $10^8$  нейронов сетчатки совершают около  $10^{10}$  аналоговых суммирований в секунду. Если проэкстраполировать быстродействие нейронов сетчатки на быстродействие мозга, получится около  $10^{12} - 10^{14}$  операций в секунду для мозга в целом.

Другой подход основан на энергетических соображениях. Зная энергозатраты мозга в целом и затраты на одну элементарную операцию, можно оценить его быстродействие. Эти оценки приводят к величинам порядка  $10^{13} - 10^{16}$  операций в секунду [9].

Оценим «тактовую частоту» мозга в «комбинаторном» подходе. Каждый нейрон работает как достаточно медленный аналоговый сумматор, однако очень большая «распараллеленность вычислений» приводит к наблюдаемой эффективности естественного интеллекта. Каждый из  $5 \times 10^{11}$  нейронов способен на  $500 = [200.. 1000]$  тактов в секунду. Таким образом, мозг делает около  $10^{14}$  актов суммирования в секунду, что соответствует однопроцессорной системе с тактовой частотой 100 ТГц (или ста тысячам 1 ГГц процессоров). Это не реализуемо пока даже на суперкомпьютерах.

Однако, как и в случае с памятью, необходимо сделать множество оговорок. Оценка производительности мозга в  $10^{14}$  операций в секунду является, конечно, **верхней границей**. Нижняя лежит ниже, но насколько – сказать пока трудно. Во-первых, работа нейронов не является независимой. Чем больше нейронов участвует в распространении возбуждения в том или ином алгоритме обработки информации, тем медленнее работает мозг. Так, в цепочке из 10 нейронов, каждый следующий нейрон возбудится только после получения сигнала от предыдущего. Таким образом, из-за синаптической задержки тактовая частота уменьшится в 10 раз.

По-видимому, нейроны в коре собраны в микроколонки со множеством связей по вертикали и малым числом связей по горизонтали. Общее число таких колонок порядка  $5 \times 10^8$ . Это может понизить тактовую производительность мозга на один-два порядка. Далее необходимо помнить, что мозг занимается **не только** интеллектуальной деятельностью. Ему необходимо заботиться о регуляции внутренней деятельности организма, управлении огромным количеством мышц и т.п.

Следует, однако, отметить один узкий момент. Быстродействие компьютера высоко пока для вычислений достаточно небольшой памяти процессора. При работе с ОЗУ это быстродействие падает в десятки раз, и еще во столько же – при работе с диском. С другой стороны, нам также неизвестно какая часть ресурсов человеческого мозга тратится на процедуры доступа к памяти. Мы снова упираемся в незнание алгоритмов интеллекта.

## Алгоритм

Таким образом, мы видим, что если по емкости памяти компьютер уже практически догнал мозг, то по быстродействию к нему приближаются пока только суперкомпьютеры. Тьюринг полагал, что главная проблема в ИИ – это память и алгоритм. И вот мы имеем, по-видимому, достаточную память, но ИИ в тьюринговском понимании пока нет. Нам не хватает, в первую очередь, алгоритма, и сейчас это, возможно, даже важнее, чем дальнейший прогресс «железа».

Обычно исследования в области ИИ идут **по двум направлениям (восходящему и нисходящему)**:

1. Разработка алгоритмов решения интеллектуальных задач.
2. Построение черного ящика (ЧЯ) для среды-носителя ИИ.

Примеры **алгоритмов** ИИ – это системы вывода формул, разработка экспертных систем, программы игры в шахматы и т.п.[10]. Т.е., это алгоритмы, направленные на решение конкретной интеллектуальной задачи и содержащие в себе полный список фиксированных правил поведения программы. Часто говорят, что как только задача алгоритмизована, она уходит из области ИИ. Так, калькулятор не назовут ИИ. Более того, говорят, что алгоритм чужд человеческому мышлению, которое «недетерминировано», «интуитивно» и «неформально». Вряд ли это верно. Незнание алгоритмов мышления не говорит об их отсутствии, а недетерминированность элементарно можно включить даже в простейший алгоритм.

Построение **ЧЯ** подразумевает создание некоторой системы, которая имела бы достаточно простые правила функционирования своих составных частей, однако при этом в целом обладала бы сложным поведением и универсальными способностями учиться и решать различные интеллектуальные задачи. Наиболее очевидный пример – нейронные сети, моделирующие систему, аналогичную мозгу [11]. Разработка ЧЯ происходит обычно от бессилия создать алгоритм: «построим что-нибудь сложное, и пусть оно само думает и создает эти алгоритмы». Построение ЧЯ, конечно, происходит на алгоритмической основе. Однако алгоритм направлен не на решение какой-то конкретной интеллектуальной задачи, а на правила функционирования системы. При этом, алгоритм функционирования системы может оказаться значительно **проще**, чем поведение этой системы. Заметим, что ЧЯ подразумевает определенную неконтролируемость ИИ. Три закона робототехники Азимова можно заложить только в алгоритмические ИИ, так что бунт машин неизбежен.

Проще всего начать копировать Природу. Нейронная сеть моделирует нервную систему, и если сделать ее ОЧЕНЬ большой, то... Сейчас в этом направлении бум, но «машина Тьюринга» пока не получилась. Мы знаем (или думаем, что знаем) как работают отдельный нейрон и простая сеть нейронов. Но мы не знаем структуры НС всего мозга. Мы не знаем, как и почему происходит ее рост и обучение. Таким образом, адекватное моделирование требует от нейробиологов ответов еще на многие вопросы. Вообще говоря, копирование мозга, по-видимому, не является оптимальным путем. Архитектура мозга и ЭВМ принципиально различны. То, что хорошо работает в одной системе, совсем необязательно должно хорошо работать в другой. Мы уже отмечали, что реализация памяти методами нейронных сетей требует значительно больше компьютерной памяти, чем при этом получается в этой модели мозга. То же самое относится к быстрдействию нейросетевых методов, что еще более болезненно в связи с отставанием компьютера от человеческого мозга по «тактовой частоте».

В конечном счете, интеллект есть сложный отклик человека на внешние стимулы. В принципе, любая сложная нелинейная система могла бы стать ИИ, но далеко не каждую такую систему мы сможем понять. Таким образом, нам необходимо построить систему, которая хотя бы в части своих поведенческих свойств пересекалась бы с поведением человека. По-видимому, создание полноценного ИИ будет идти в направлении интеграции обоих направлений. С одной стороны, вряд ли реализуем универсальный алгоритм, с другой – глупо (хотя интересно) создавать нейронную сеть для решения арифметических задач: она, по определению, будет работать медленнее. Таким образом, ИИ будущего (ближайшего ?) – это сложная нелинейная система (ЧЯ), осуществляющая целевую, поведенческую функцию, дополненная большим числом эффективных алгоритмов решения конкретных задач.

## Заключение

То, что мы называем высшей нервной деятельностью, является процессом, который может протекать в различных носителях. Неорганика хороша тем, что может легко заменяться и наращиваться. По сути, это реальный **путь к бессмертию** конкретного «Я» и наиболее захватывающая перспектива ИИ [12]. Кроме того, общественное сознание в настоящее время состоит из достаточно изолированных «Я». Тенденции последнего десятилетия говорят о том, что по-видимому, в будущем, произойдет постепенная интеграция отдельных ИИ в единый распределенный «супер-ИИ».

Органика эволюционирует очень медленно, тогда как успехи кибернетики последних пятидесяти лет показывают, с какой колоссальной скоростью возможно неорганическое усложнение. Если цель Природы состоит в создании все более совершенных (сложных) существ, то очевидно, что человек в его нынешнем облике только временно находится на вершине иерархии этих

существ. Природа была вынуждена экспериментировать с таким «несовершенным» материалом как органика по той причине, что кремний нельзя было заставить мутировать и собираться в микросхемы. В качестве промежуточного звена необходимо было создать «биологического робота», который был бы способен целенаправленно заняться **усложнением неорганической материи**. Так что, возможно, мы являемся промежуточным звеном на пути усложнения неорганики.

Рано или поздно, но неорганические творения станут значительно сложнее человека. Построение ИИ – вопрос только времени. Когда это произойдет, человек окажется в крайне непростой психологической ситуации. Зачем биться над решением математической проблемы или мучаться, создавая новую музыку, если ИИ делает это быстрее и лучше. Более того, со временем человек просто перестанет понимать, что делает ИИ. Возможно ли такое сосуществование человека и ИИ?

По-видимому, наиболее приемлемый путь для человечества – это постепенная **«киборфикация»**. Для этого необходимо создание гибридных (органика + неорганика) микросхем. Уже анонсировано (Reuter, 29-июня-00) создание микросхемы – искусственной сетчатки для людей с потерянными зрением. Только постепенный переход будет для человечества безболезненным. Сперва добавим чип памяти для быстрого изучения иностранных языков, затем пару процессоров для регуляции нарушенных функций, а там и оглянуться не успеем, как полностью перейдем на неорганику. По крайней мере, это лучше, чем бунт машин или деградация. Одновременные большие успехи в биологии и кибернетике последних лет позволяют, по крайней мере, надеяться на осуществление этого пути.

Авторы благодарят проф. Савченко Л.П. за ряд ценных замечаний.

## Литература

1. Turing A.M. «Computing Machinery and Intelligence».– «Mind», 1950. – V.59, –P. 433-460 (перевод в кн. Тьюринг А. «*Может ли машина мыслить?*»: – М.: ФМ, 1960. )
2. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедер Л. «*Мозг, разум и поведение*». – М.: Мир, 1988.
3. Koch C. January 16, of Nature, 1997.
4. Borst A., Theunissen F.E., «*Information theory and neural coding*» // Nature (Neuroscience). – 1999. – V.2. – P. 947-954.
5. Kelso J.A. «*Dynamic patterns*». MIT Press, 1995. – P. 334.
6. Нейман Дж. «Общая и логическая теория автоматов», 1951. (Приложение к книге Тьюринг А. «*Может ли машина мыслить?*». М.: ФМ, 1960. )
7. Thomas K. Landauer «*How Much Do People Remember? Some Estimates of the Quantity of Learned Information in Long-term Memory*» // Cognitive Science. – 1986. –V 10. – P. 477-493.
8. Hans Moravec «*Mind Children*». – Harvard University Press, 1988.
9. Ralph C. Merkle «*Energy Limits to the Computational Power of the Human Brain*» Foresight Update No. 6, August 1989.
10. *Справочник. Искусственный Интеллект*, кн. 1-3. – М.: Радио и связь, 1990.
11. Уоссермен Ф. «*Нейрокомпьютерная техника*». – М.: Мир, 1992.
12. Корчмарюк Я.И. *Сетплеретика*. – Международный симпозиум «Стратегия развития России в третьем тысячелетии» – Дубна: НЭФ им. В.И.Вернадского, 1997.