

АСИНХРОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ. ЧАСТЬ I. ВРЕМЯ КАК НЕМАТЕРИАЛЬНАЯ СРЕДА ПАМЯТИ.

А.В. Денисенко

bp.denisenko@mail.ru

Поступила 20.11.2018

Искусственная нейронная сеть рассматривается как память. Работа такой сети состоит в непрерывном независимом выполнении процессов в её элементах без требования центральной синхронизации. Относительные временные сдвиги этих процессов оказываются информационным хранилищем очень большой ёмкости. Перечисляются некоторые свойства и эффекты природных нейронных систем. Работы И.Сеченова и А.Ухтомского используются как подсказки для разработчиков. Дана оценка ёмкости такой памяти.

Ключевые слова – асинхронная нейронная сеть, доминанта Ухтомского, пороговое суммирование, реконфигурация, интервальные числа

УДК 001(06)+004.032.26(06)

DOI: 10.31145/2224-8412-2018-19-1-05-50

Введение

На основании работ Ивана Сеченова [1] предлагается отказаться от явной тотальной синхронизации, рассматривая в качестве основных объектов сети не сами элементы (тела нейронов) и их статические состояния, а каналы связи между ними (аксоны) и протекающие в них процессы в их динамике. Мы воспользуемся концепцией Доминанты Алексея Ухтомского [2], а также некоторыми особенностями живых нервных сетей, которые усложнят структуры модели, но позволят упростить управляющие механизмы (алгоритмы и программы).

Коннектом (коннектомика) – подход в нейроинформатике, основанный на представлении нейронной сети в виде графа (возможно, ориентированного), вершины которого соответствуют нейронам, а рёбра – аксонам. Как и персептрон Розенблата, этот подход достаточно разработан и дал немало результатов в распознавании образов и системах искусственного интеллекта. В последние годы он расширен или фактически заменён когнитивом К.Анохина, включающим широкий спектр естественных и гуманитарных наук, что нашло отражение в программе редактирования генома. В то же время растёт интерес к теории Доминанты Алексея Ухтомского, что отражено в появлении монографии М.Надина [3], целиком посвящённой работе российских учёных по этой тематике. В англоязычной литературе принят термин «антиципация», то есть упреждение у инженеров или предвосхищение в науках гуманитарных. В компьютерных науках развивается тематика самосборки [4] больших вычислительных систем, где остро стоит вопрос о синхронизации параллельных процессов. В молекулярной генетике существует проблема пространственной упаковки молекул ДНК как аperiodической кристаллической структуры и парадокс её размещения в заведомо недостаточном объёме клеточного ядра [5].

Асинхронность означает отсутствие синхронизации как единого центрального механизма согласования событий в системе из элементов с одновременно идущими процессами. Отказ от синхронизации основан на том, что в живых нейронных сетях не замечено явных аналогов шага из теории алгоритмов, как и аналога синхроимпульса электронной схемы. Возможно, что поддержание порядка событий во времени обеспечивается самой структурой нейронной сети, физико-химическими законами пространства электрических импульсов и их статистической природой.

1. КОМПЬЮТЕР И ЖИВАЯ ПАМЯТЬ

1.1. Флэш-мобы, оркестры, генераторы.

«Что такое *флэш-моб*? Если переводить дословно с английского, то получится что-то вроде «вспышка толпа». Но это как-то не очень по-русски звучит. Думается, что «мгновенная толпа», то есть толпа, мгновенно собравшаяся, вспыхнувшая – это ближе и к родному языку, да и к сути происходящего. Флэш-моб – это акция без руководителя, никакого командного центра нет: никто не может указывать участникам действий, что им делать» (<https://staff-online.ru/fleshmob-raznovidnosti-sovety-po-organizacii-preimuschestva-i-riski/>). На самом деле, руководитель-режиссёр есть, но не обязан находиться среди участников во время действия. И каждый участник знает, что ему делать по заранее полученной инструкции. Иногда есть аналог парадного дирижёра, контролирующий общий ритм действия. Вспомним волны, запускаемые фанатами на стадионах, состо-

ящие из их цветных тряпок. Дирижёра никакого нет, кроме стартового сигнала – а синхронизация каждого фаната происходит только со своим соседом.

Что и как долго оркестр может играть без дирижёра? Что-то и сколько-то, конечно, может, хотя не всё и иногда кое-как. А может ли он играть без партитуры у музыкантов? Или имея одну и ту же простенькую партитуру у всех? Когда военный оркестр выходит на Красную Площадь, мы не видим дирижёра – есть лишь ведущий, отбивающий жезлом с флажком нужный оркестру темп, точнее – синхронизирующий возможные отклонения каждого музыканта в контрольных точках марша. Когда в концертном зале играет симфонический оркестр, партитуры у каждого музыканта довольно объёмистые и дирижёр подаёт музыкантам самые разнообразные и мудрёные знаки. Есть ли и какой дирижёр в нашей голове? А в нервной системе моллюска, насекомого, водяного медведя?

Наша алгоритмическая и электронная культура явно или неявно базируется на пошаговой синхронизации. В больших вычислительных комплексах одна из сложнейших проблем – синхронизация параллельной работы процессоров. Компьютер основан на непременном согласовании переходных электрических процессов в большом числе компонент, физически разнесённых друг от друга. В теории алгоритмов и методике блочсхем синхронизация происходит по событиям – завершению предыдущего шага работы.

Пример большой асинхронной системы – Мировая паутина с разнообразием протоколов и соглашений, прежде всего – семиуровневая модель OSI, соглашения консорциума W3C. Интернет-ресурсы в массе своей возникают, исчезают и изменяются совершенно автономно, каждый в своём темпе и времени. Количество узлов в корпоративных сетях, а тем более – в Интернете, сравнимо по порядку с количеством нейронов в нервных сетях не только насекомых, но и высших организмов. Астрономическое число нейронов работают достаточно автономно. Тем не менее наблюдаемый при этом хаос бегущих электрических импульсов завершается детерминированными реакциями сети в целом. Каким образом локальные взаимодействия нейронов обеспечивают глобальную устойчивость реакций нервной системы?

В дальнейшем синхронную схему для удобства назовём **ХТН** – от имён аль-Хорезми, Алана Тьюринга и Джона фон-Неймана.

В последние годы произошло несколько важных для нейроинформатики событий. Технология изучения природных нейронных систем нейробиологами достигла точности порядка 2 мкм, что обеспечило возможность попадания электрода в одиночную нервную клетку или нервное волокно. Ранее существовавшие технологии точности порядка 20-100 мкм позволяли изучать лишь интегральные, то есть обобщённые электрические величины,

усреднённые по области в несколько сотен клеток (кроме разве что знаменитого аксона кальмара). Фактически экспериментальная нейрофизиология в состоянии предоставить данные о работе нервной клетки и нервного волокна практически любого отдела природной нейронной сети. Эта возможность со стороны инженеров используется явно недостаточно.

Не будем говорить о системах искусственного интеллекта или пытаться построить свою модель мозга. Речь пойдёт о тех фундаментальных законах, которыми можно объяснить некоторые эффекты, присущие нейронным сетям живой природы – начиная от сенсорных систем простых организмов, и что из этого можно использовать при построении компьютерных моделей нейронных сетей. Мы ограничимся рассмотрением феномена памяти искусственных нейронных сетей, то есть задачами невычислительного характера.

Немного о терминологии. В большинстве случаев для удобства восприятия инженерами будем говорить об элементах и каналах сети (вместо нейронов и аксонов), а также о буферах (вместо дендритов) и ветвях каналов. Это ещё раз подчеркнет, что речь не идёт о моделировании мозга. Вместо потенциалов действия нам удобно говорить об электрических импульсах, зарядах, сигналах или волнах.

1.2. Память глазами обывателя

«Память» – это в разном контексте либо запоминающая среда с её возможным содержимым, например каменная стена, лист бумаги, микросхема, винчестер или файл, база данны, либо феномен, эффект запоминания, который проявляется как смена реакции на внешнее воздействие. Последнее связано с такими понятиями как адаптация и обучение. Память в смысле содержимого в привычном понимании – это возможность различить наличие или отсутствие объекта в системе. Есть ли в словаре то или иное слово, анкета конкретного человека в базе данных, какие-нибудь величины и свойства интересующего нас объекта. Пример феномена памяти – это, например, житейский опыт. Я помню дорогу домой; помню, что огонь горячий, а лёд холодный. Крыса помнит удачную дорогу в лабиринте.

Важная черта содержимого памяти в обыденном понимании – её «кочность». Слово, однажды записанное в словарь, может храниться там неограниченно долго и может неограниченное число раз извлекаться оттуда – без потери или искажения содержимого. Файл может «скачиваться» с сайта неограниченное число раз. Можно совершенно однозначно измерить содержимое такой памяти – в байтах.

Можно сказать, что эффект живой памяти – это смена реакции на одинаковые внешние импульсы до и после запоминания. Память – это различимый наблюдателем стабильный след от внешнего воздействия. Живая память – это смена временной развёртки или трассы состояний сети.



Рис.1. Игра в шар

В практике физического мира есть на удивление простые с виду задачи, которые, однако не имеют простых математических решений. Достаточно упомянуть задачу трёх тел в классической механике.

В качестве отступления хочется привести пример, который современнику покажется даже более простым, хотя этой задаче много столетий. Это так называемая Игра Понтифика. Она описана ещё в 15 веке Николаем Кузанским и очень поучительна даже для нас сегодняшних. Шар имеет вмятину. Понтифик любил катнуть его по очень ровному полу и смотреть за тем, какой след он оставит. Отошлём читателя к труду Николая Кузанского [6] за интересными выводами из такого наблюдения. Шар может покувыркаться немного и встать или совсем не кувыркаться и проехать небольшой отрезок. А дальше разнообразие линий зависело случайным образом от скорости толчка. В основном это были следы, похожие на струи фонтана. Некоторые водители выражают это лозунгом «выше скорость – меньше ям». Но и сегодня нет не только аналитического решения этой задачи, но и сколько-нибудь убедительной имитационной модели. Хотя очевидно, что результат на определённом уровне рассмотрения как-то зависит от скорости. А ведь мозг даже лягушки – это не шар со вмятиной.

Результаты этой игры аналитически непредсказуемы и не поддаются методам типа конечных элементов. Но если посмотреть на многовековые следы, оставленные бросаниями такого мятого шара, то рисунок будет виден достаточно отчётливо – пальмовые ветви разной глубины и резкости, раз-

личные для разных шаров. Это – следы статистических свойств. Нечто подобное мы можем ожидать и в нашей модели.

1.3. Парадоксы и ограничения живой памяти

Недостатки природной памяти – недетерминированность, забывание, усталость, распад, необходимость сна как периодической изоляции, невозможность дампа и сортировки, невозможность волевого забывания -паразитное всплытие ненужного, навязчивость.

Компьютер может иметь до нескольких тысяч процессоров, терабайты памяти, терафлопы частоты. Сигналы по электрическим цепям носятся почти на скорости света. Корпоративные и социальные сети могут иметь миллионы узлов. А что в Живой памяти? Прежде всего – Живая память совершенно не умеет вычислять. Но ей – в отличие от компьютера присущи следующие удивительные особенности.

1. Низкие скорости распространения сигнала – от 1 до сотни метров в секунду
2. Возможность сложного поведения, адаптации, памяти при совсем небольшом числе элементов -от нескольких штук у низших организмов
3. Простота физических принципов работы – пороговое накопление и сброс заряда, передача импульса по ветвящимся каналам
4. Отсутствие процессора и явной синхронизации элементов сети
5. Голографичность – физическое удаление части сети не обязательно приводит к заметной потере содержимого памяти в целом
6. Отсутствие однозначно определяемого места хранения информационного объекта – они как бы распределены в той или иной области
7. Экономичная и замкнутая энергетика – нет заметного тепловыделения и энергопотребления
8. Непрерывность активной работы даже во сне; отсутствие начала работы как такового за счёт наследования от живой материнской системы и завершение нормального функционирования только при физическом распаде, то есть гибели организма
9. Быстрота и разнообразие реакций – незафиксированная предельная ёмкость памяти
10. Адаптивность и адекватность реакций – способность накапливать и хранить опыт в процессе работы Непроизвольное всплытие содержимого памяти, даже, казалось бы, потерянного навсегда, причём в мельчайших подробностях вместо извлечения такового по определённому адресу

11. Наследование получаемой и передаваемой информации от родительской системы к дочерней и узнавание «своих»
12. Возникновение и подготовка реакции без внешнего стимула – усилением воли или спонтанно.
13. Эффект антиципации – упреждения в инженерном понимании или предвосхищения в гуманитарном; формирование очагов возбуждения/торможения до появления стимула на входе.
14. Самопроизвольное зарождение очагов возбуждения и их самораспад.
15. Невозможность насильственного забывания; навязчивость состояний
16. Невозможность запоминания абракадабры и бессмыслицы. Можно запомнить связный текст на языке, особенно рифмованный или ритмизированный, но подчас невозможно запомнить даже не очень длинный ряд случайной последовательности букв. Можно, прослушав небольшой текст на незнакомом языке, заключить, что это живой язык, а не белый шум
17. Фаза сна, существенная по времени, в ходе которой происходит усвоение/стирание опыта, накопленного в активной фазе, включая динамику запоминающих структур – клеток и связей
18. Отсутствие явного механизма оценки – как и периода обучения как такового. Поступившая извне информация и реакции на неё выполняются в значительной мере самой памятью. Знакомая информация «укладывается» в имеющиеся структуры, незнакомая откладывается или отторгается.
19. Анабиоз и криптобиоз. Это одно из самых загадочных явлений у некоторых видов организмов. В отличие от сезонной спячки ежей или медведей, в анабиозе происходит практически полная остановка обменных процессов, что может объясняться грубостью наших приборов, а может и фактически происходить. Нас прежде всего впечатляет выживание нервной системы при быстром выходе из анабиоза. Можно предположить, что содержимое памяти при этом восстанавливается в значительной мере благодаря сохраняющейся структуре нервной сети и каких-то свойств ткани. В растительном мире аналог анабиоза – споры.

И много-много что ещё.

В качестве иллюстрации многочисленных чудес приведём такой вид, как *Tardigrada* или так называемый водяной медведь, тихоходка или бессмертник, изображение проводится на Рис. 2.

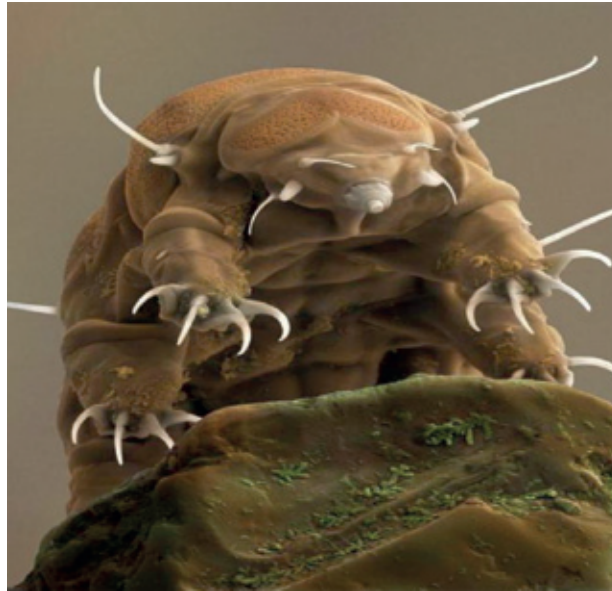


Рис.2. Tardigrada – Водяной медведь – Тихоходка. Размер – до 1 мм.

Открыл тихоходку пастор И.А.Гёце в 1777 г, изучал и дал название итальянский натуралист, физик иезуит Лазаро Спалланцани, известный больше экспериментами по отрицанию самозарождения живых организмов из неживой материи. Этот медведь может буквально на глазах ожить после нескольких веков сухой спячки, выжить при почти космической температуре и даже под космическими лучами. И у него есть механизмы дыхания, аналог кровеносной системы и нервная сеть! И ещё он может переносить гены с одного вида кормящего его живого материала на другой!

2. НЕОТВЕЧЕННЫЕ ВОПРОСЫ – СТАРЫЕ И НОВЫЕ

2.1. Шрёдингер

Работа Шрёдингера [7] вышла во время Второй мировой войны (1943). Её актуальность сохраняется и сегодня, несмотря на большое число открытий, сделанных с тех пор в науках о живой природе. Мы ещё раз вернёмся к его работе при обсуждении аналоговой и дискретной природы нервного импульса. Пока достаточно того, что дискретность он понимал как квантовые переходы состояний объекта между разными энергетическими уровнями. Вот его важные для нас слова о пространстве и времени в живой природе и связь с кристаллохимией (или кристаллографией), а также о статистической природе действующих там законов.

«Большой, важный и очень часто обсуждаемый вопрос заключается в следующем: как физика и химия смогут объяснить те явления в *пространстве и времени*, которые имеют место внутри живого организма?...»

«...все атомы находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении, которое, так сказать, противостоит их упорядоченному поведению и не

позволяет отнести к какому бы то ни было распознаваемому закону события, происходящие между малым числом атомов. Все физические и химические законы, которые, как известно, играют важную роль в жизни организмов, являются *статистическими*. Любой другой вид закономерности и упорядоченности, который можно себе представить, постоянно нарушается и становится недействительным вследствие непрерывного теплового движения...»

2.2. Уоддингтон

Работа Уоддингтона [8] вышла в 60-е годы прошлого века, но как и книга Шрёдингера, сохраняет актуальность в интересующих нас позициях. В ней, возможно, впервые возникла тема выполнения второго начала термодинамики в живом организме. Дискуссия на эту тему между биологами (особенно физиологами) настолько горяча, что мы сейчас не будем в неё углубляться. Следует, однако, упомянуть в этой связи имя Ильи Аркадьевича Аршавского, нейрофизиолога и педиатра, автора так называемого «Энергетического правила скелетных мышц», которое непосредственно связано с теорией Доминанты. Несколько выдержек из Уоддингтона:

«... система может быть названа живой, если в ней закодирована передаваемая по наследству информация, если эта информация иногда претерпевает изменения и если измененная информация также наследуется.»

«...Генетическая информация может быть закодирована и в других соединениях и реализована иным путем. Такой подход оказывается значительно более широким, когда мы обсуждаем возможность существования чего-то, достойного быть названным «жизнью», на других планетах или звездах, где физико-химические условия коренным образом отличаются от условий на Земле ...»

... В целом же теория информации как таковая бесполезна при анализе соотношения между генотипом и фенотипом, хотя слово «информация», если использовать его в широком смысле, с успехом заменяет такие выражения, как «количество разнообразия» или «специфичность...»

«Примерно в 1948 г. Шеннон и Уивер разработали элегантную математическую теорию для рассмотрения некоторых проблем, требующих количественной оценки разнообразия или специфичности той или иной системы. В биологии существует множество проблем, о которых так и хочется говорить в тех же терминах количества разнообразия или специфичности....»

Однако, когда мы переходим к рассмотрению связей между генотипом и фенотипом, ограниченность этой теории выявляется со всей силой и она быстро становится не просто бесполезной, но даже опасной...

... С точки зрения здравого смысла вполне очевидно, что кролик, бегущий по полю, содержит значительно большее количество разнообразия, чем

только что оплодотворенная кроличья яйцеклетка. Можно ли подойти к этой ситуации с точки зрения «теории информации», основной принцип которой состоит в том, что количество информации не может увеличиваться?»

2.3. Супрамолекулярная химия и самоорганизация

Этот раздел химии занимается процессами конструирования и организации соединений, превышающих молекулы. По-русски проще было бы назвать его «надмолекулярной» или «внемолекулярной» химией. Создатель всего этого – Жан Мари Лен, лауреат нобелевской премии. В его работах мы встречаем такие понятия как самоорганизация без аналога центрального процессора, фазовые переходы пространственных и временных волн. Для нас особенно интересно такое мнение Ж.М.Лена[9]:

«Почему жизнь приняла именно такие формы, которые мы знаем... Могут ли существовать и существуют ли в действительности другие формы жизни; возможна ли искусственная жизнь? Задавая такой вопрос, мы уже как бы подразумеваем возможность предпринять шаги для создания когда-нибудь, в отдалённом будущем, других форм жизни...»

Такое понимание отличается от широко распространённого мнения о том, что такое природоподобные технологии. Применительно к искусственным нейронным сетевым моделям это совершенно очевидно. Нет нужды копировать известные природные механизмы физико-химического и вообще материализованного уровня; наша дальняя цель – превзойти созданные природой механизмы и возможности.

2.4. Из догматов нейроинформатики

Встретившийся ещё у Шрёдингера термин «эпигенетика» оказался в центре внимания при спорах вокруг Ламарковского и Дарвиновского подходов. Признано, что есть такой тип наследственности, передаваемый мимо ДНК, который, впрочем, не то чтобы полноценная наследственность. Обратимся к последним опубликованным источникам – монографиям в области эволюционной генетики и молекулярной биологии.

Евгений Кунин [10]:

«...По сути, Утсон и Крик вывели из структуры ДНК биологическое воплощение общего принципа цифрового хранения, кодирования и передачи информации. Система биологической передачи информации, которую выявили их исследования, может рассматриваться как расширение принципа машины Тьюринга...»

В чём именно состоит это «расширение», остаётся предметом споров. Вот о кодировке информации линейной кодовой последовательностью:

«Генетический материал любого организма состоит из линейной последовательности символов, четырёх оснований нуклеиновых кислот, которая,

прямо или косвенно кодирует всю информацию, необходимую для построения организма.»

Впрочем, автор тут же делает оговорку – «кроме некоторых вариантов эпигенетической наследственности». Не будем углубляться в споры ламаркистов с дарвинистами – при разработке модели это оказывается несущественным.

И вот ещё примечательное замечание из свежей монографии Сергея Ястребова[11], стр.208:

«...Почему энтелехия исчезла из науки? Не в последнюю очередь потому, что её так никто никогда и не сумел количественно измерить. Информация же вполне измерима, о чём прекрасно знает любой пользователь современного компьютера. А ведь наследственная информация по своей природе ничем принципиально не отличается от той, которая записывается и копируется в технических устройствах...» И далее: «Важнейший для понимания всей современной биологии факт состоит в следующем: наследственная информация – цифровая... Мендель доказал цифровой характер наследственной информации уже экспериментально...».

Попытаемся обосновать альтернативную точку зрения.

2.5. Кристаллография

Неожиданно для многих в наши дни новым центром межпредметных исследований в самом широком смысле, включая так называемые нейронауки, стала кристаллография. Возможно, это объяснимо в силу того, что ДНК оказалась так называемым аperiодическим кристаллом. Прошедший в ноябре 2016 года на ВДНХ первый Российский кристаллографический конгресс (председатель – М.В.Ковальчук) включил весь спектр проблем, относящихся и к нейронаукам – от рентгенографии до гуманитарных вопросов. Сложилась и аббревиатура этой новой области – НБИКС (нейро, био, инфо, когно, социогуманитарных наук).

Для нас интерес сейчас небольшой вопрос о генетических мутациях, ошибках реакций сети и дефектах кристаллической решётки – это ошибки природы или проявления статистических законов?

2.6. Подсказки от Ивана Сеченова

Приведём несколько цитат из Ивана Сеченова, и поясним, что они могут означать для разработчиков нейронных сетей. Для удобства дальнейших ссылок сопроводим их краткими названиями, которые выделены полужирным курсивом.

Слово и дело. «...Войдёмте же, любезный читатель, в тот мир явлений, который рождается из деятельности головного мозга...

...Всё бесконечное разнообразие внешних проявлений мозговой деятель-

ности сводится окончательно к одному лишь явлению – мышечному движению. Смеётся ли ребёнок при виде игрушки, улыбается ли Гарибальди, когда его гонят за излишнюю любовь к родине, ... создаёт ли Ньютон мировые законы и пишет их на бумаге – везде окончательным шагом является мышечное движение. Напомню рамку, созданную умом народов и в которую укладываются все вообще проявления Мозговой деятельности, рамка эта – *слово и дело*. Под *делом* Народный ум понимает, без сомнения, всякую внешнюю механическую деятельность человека, которая возможна лишь при посредстве мышц. А под *словом* уже вы, вследствие вашего развития, должны понимать, любезный читатель, известное сочетание звуков, которые произведены в гортани и полости рта при посредстве опять же мышечных движений...

... задача наша будет состоять в определении путей, которыми развиваются из головного мозга мышечные движения вообще...»

Значит, результат срабатывания нейронной сети скорее совокупность сигналов, распределённых в пространстве и времени, чем просто вектор состояний элементов, именуемых выходами сети.

Нервная дама. «...Дана нервная дама. Вы её предупреждаете, что сейчас стукнете рукой по столу, и стучите. Звук падает в таком случае на слуховой нерв дамы не внезапно, не неожиданно; тем менее она вздрагивает... Стучанье по столу продолжается с разрешения дамы с прежней силою, и теперь уже вы делаете несколько ударов в минуту. Приходит, наконец, время, когда стук перестаёт действовать на нервы; дама не вздрагивает более... Севастопольский герой, например, слушавший (вследствие постепенной привычки) хладнокровно канонаду из тысячи пушек, конечно, вздрогнул бы при пальбе из миллиона... головной мозг в деле произведения движений является машиной...»

Значит, реакция сети может затухать при многократном поступлении стимула, но до определённого порога.

Торможение как результат возбуждения «...Эд.Вебер показывает прямыми опытами, что возбуждение блуждающего нерва, который даёт, между прочим, ветви и сердцу, не только не усиливает деятельность последнего органа, но даже парализует его... .Итак, сомневаться нельзя – всякое противодействие чувственному раздражению должно заключаться в игре механизмов, задерживающих отражённые движения.»

Это означает, что у процесса торможения реакций должен быть источник возбуждения.

Эскалация реакций. «...Если, например, раздражать пёрышком кожу лица (в которой разветвляется трёхраздельный нерв) у человека во время глубокого сна, то при слабом раздражении замечается лишь сокращение личных мышц, при более сильном отражённое движение может появиться и в руке, а при очень сильном человек проснётся и вскочит, т.е. рефлекс-

сы получатся чуть не во всех мышцах тела... Другое дело когда головной мозг деятелен... Про медведей рассказывают, что от внезапного испуга (т.е. от внезапного раздражения чувствующего нерва) они бросаются бежать со всех ног и с ними даже делается кровавый понос. На людях явление это выражается иногда ещё резче. Примером могут служить истерические женщины, с которыми делаются конвульсии во всём теле (отражённые движения) от неожиданного стука или от внезапного прикосновения к их коже постороннего тела.»

Это значит, что степень реакции сети не просто возрастает с увеличением стимула, то может меняться в зависимости от прогноза.

Клетка как связь волокон «... Здесь же сложное явление сведено на деятельность лишь одного первичного нервного волокна и на несколько нервных клеток, служащих этим волокнам связью...»

Это важнейшая из подсказок Ивана Сеченова в нашем рассмотрении. Клетки являются связью волокон, а не наоборот.

3. Хронотоп

Хронотоп как единая концепция пространства и времени, упоминается большей частью в гуманитарных сферах и связан с именем Михаила Батхина [12]. В нейрофизиологии это работы Алексея Ухтомского. В более широком смысле можно под этим термином понимать связь пространства и времени в самых разных областях. Для нас это сфера компьютерного моделирования.

До недавнего времени нашими переводчиками (включая переводы работ А.Тьюринга) использовался термин «пространственно-временной континуум» для английского space-time. Мы будем использовать термин Хронотоп.

В естественных науках традиционно используется так называемое ньютоновское пространство-время. Это трехмерная система координат с осями из вещественных чисел и с линейными алгебраическими законами. Время континуально и измеряется цезиевыми часами. Можно напомнить работы Лайнуса Полинга, чтобы прояснить роль пространственно-временных построений в науке. Во-первых, это теория химического резонанса. Нет как такового бензола, а есть совокупность нескольких канонических конфигураций электронных структур, которые проходятся веществом с известными вероятностями. Можно считать, что это прохождение состояний во времени с определённой частотой. Каждая конфигурация придаёт веществу свои отличительные свойства. Это про время. Про геометрию пространства приведём другой пример – тоже про Полинга. Речь идёт о структуре молекулы белка. В литературе хранится история этого открытия [13]. Экспериментальные данные рентгена давали определённые соотношения расстояний между элементами молекулы белка, которые прямо нарушали теорему Пифагора. Однажды Лайнус Полинг в задумчивости нарисовал куски молекулы на те-

традном листке и в какой-то момент свернул листок в трубку. Так и родилась идея двойной пространственной спиральной структуры молекулы. При этом пространство, вообще говоря, становится более сложным, чем в евклидовой геометрии и скорее относится к топологии. Л.Полингу не удалось, однако, использовать тройную спираль для изображения структуры ДНК. Тройную спираль удалось обнаружить позже. В книге Максима Франк-Каменецкого подробно обсуждается молекулярная пространственная структура ДНК. Оказалось, например, что зачастую непросто обнаружить начало и конец молекулы. Это означает, что существуют очень замысловатые замкнутые пространственные структуры таких молекул, включая кольца и узлы. Аналогичные структуры возникают и при изображении трассы асинхронной сети. В той же книге есть ещё два интересных нам замечания. Длина молекулы ДНК в клетке человека можно оценить в 2 м, что в миллион раз больше диаметра клеточного ядра. Двухспиральная молекула ДНК чаще всего свёрнута в клубок, размер которого в тысячу меньше длины молекулы ДНК, но и в 1000 раз больше диаметра ядра клетки. Молекула ДНК как бы навивается на некоторую катушку и тогда клубок диаметром 0.5 мм втискивается в ядро диаметром меньше микрометра ([5], стр. 65). Там же на стр. 140 приведён код генома кишечной палочки открытый Атсуо Нокатой. Там последовательность из 29 нуклеотидов строго чередуется 14 раз со случайным набором 32 или 33 нуклеотидов. Мы встретим похожий эффект в трассах асинхронных сетей. В обоих случаях можно подозревать не только геометрические и молекулярные механизмы, но своего рода алгоритмическую раскрутку некоторых структур во времени.

3.1. Время как пропущенный аргумент

В алгоритмах работы синхронной сети время устроено тиками – шагами, на каждом из которых дискретные состояния элементов пересчитываются, синхронно начинаясь и завершаясь по некоторым относительно простым правилам. Записывается это в математической нотации с разными вариациями примерно так

$$Y = F (X_1, \dots, X_N)$$

где X_1, \dots, X_N – значения на входах некоторого элемента, Y – значение на его выходе.

Входы – это элементы, стрелки от которых «входят» в данный элемент, выход – значение, передаваемое по стрелке, ведущей из элемента, на принимающий элемент. Значение – это числовая величина.

Знак равенства тоже следует уточнить. Когда в первых учебниках по информатике появились уравнения типа $X=X+1$, учителя математики были приятно

удивлены. В алгоритмических языках иногда использовали другие знаки ‘:=’ или ‘<-’ и называли присваиванием. Корректнее было бы использовать принятую в физике более длинную нотацию, использующую время. Например,

$$X(t+1) = F(X(t))$$

то есть значение слева на каком-то шаге есть функция значения на шаге предыдущем.

Для нейронной сети это выглядело бы так

$$Y(T+DT)=F(X_1(T), \dots, X_N(T))$$

где DT – максимум из времён всех вычислений на данном шаге по сети. Это и есть синхронизированная сеть.

Заметим, что если граф не ориентированный, то есть вместо стрелок – линии, а элементы выстроены в клетки типа шахматных, то это – игра Дж. Конвея «Жизнь». В компьютерной реализации эта популярная игра сразу наталкивается на простую проблему – значения в соседних элементах сами зависят от рассматриваемого элемента. Приходится вводить вторую память – копию состояний всех элементов как исходных данных на предыдущем шаге. Шаги всё так же – едины для всей сети. В некоторых моделях это решение воспроизводилось – программно или аппаратно. Но в живой природе не замечено ничего подобного – ни копии состояний памяти в предыдущий момент, ни единого шага. Очевидный выход из этой западни элементов как функции и аргументов одновременно и приводит к ориентированному графу, когда на одном конце стрелки – аргумент, на другом – функция. Конфликт, впрочем, лишь откладывается – если в ориентированном графе есть цикл, то проблема возвращается – величина зависит от себя самой. Что в каком порядке считать? Персептрон Розенблата – это дерево, то есть ориентированный граф без циклов. Так же естественно возникают и многослойные схемы – значения на каждом слое зависят от значений предыдущего слоя. 4-5 слоёв кажутся похожими на живые нейронные структуры. В ряде случаев подобные схемы дают вполне приемлемый результат, например, при распознавании образов.

Какое отношение такие схемы имеют к реальной нервной системе? Не большее, чем планетарная атомная модель имела к реальному атому. Однако она была необходима. Сегодня ведутся очень интенсивные работы по описанию и построению более адекватных и значительно более сложных моделей, отражающих быстро накапливающиеся экспериментальные данные. Есть причина, по которой мы не предлагаем в этом участвовать. Копирование природных систем – не просто сложная и неисчерпаемая задача, но на её пути мы повторяем те физические, химические, эволюционные и

прочие ограничения, которые довлеют над любым объектом живой природы и даже неважно, эволюционный это взгляд или креационистский! Компьютерная модель, вообще говоря, даёт полную свободы нашей фантазии – принципиальную возможность игнорировать законы природы – геометрию и топологию физического пространства, структуру времени, молекулярные законы физики и химии, то есть все те ограничения, которые стояли перед Эволюцией или Создателем. Нет сомнений в том, что в компьютерных моделях возможны результаты, принципиально недопустимые в «естественной» системе. В то же время нельзя игнорировать достижения экспериментальной нейрофизиологии, как и результаты других наук, используя их как полезные подсказки. Представления многих инженеров, студентов и школьников о нейронах иногда сильно отстают от времени. Ещё большая трудность – сложившаяся проблема частого взаимного непонимания между биологами и инженерами. Здесь и нестыковка терминологий, подходов, критериев, подчас игнорирование подходов и результатов в смежных областях.

3.2. Асинхронная банка Горбаня

Простейший пример асинхронности предложил профессор Александр Горбань (Красноярск-Лейстер) ещё в прошлом веке. Нейронную сеть можно представить, как банку с водой, в которой плавают «слова». Каждое такое слово плавает без всякого центрального управления-дирижёра, процессора, синхроимпульса – в своём индивидуальном времени и по своим случайным траекториям. В банку можно закидывать новые слова, вылавливать равные или похожие. Похожие или равные слова могут склеиваться друг с другом. Банку можно и высушить – на дне осядет весь наш активный вокабуляр.

Заметим, что асинхронные операции слияния пар одинаковых кодов – эффективный алгоритм суммирования. Подобная схема использовалась в Древнем Египте.



Рис.3. Банка Горбаня с плавающими словами

3.3. Время Кроника

Из многих областей науки психология, пожалуй, ближе всего к нашим проблемам. Ещё в 80-е годы прошлого века были проведены эксперименты, показавшие целый ряд парадоксов. Приведём лишь некоторые из них из [14]. Видно нарушение привычных законов иерархии-вложенности. «Как быть с событием, начало и конец которого принадлежат хронологическому прошлому или хронологическому будущему, а само событие переживается настоящим? Таких событий в эксперименте оказалось 22 процента, что никак нельзя объяснить случайностью... Исследование обнаружило ещё один важный факт, свидетельствующий о несостоятельности квантовой интерпретации психологического настоящего. Если бы «квант настоящего», задаваемый индивидуальными особенностями личности либо начальной и конечной датами реализующегося составного события, действительно существовал, то события психологического настоящего непосредственно следовали бы друг за другом, образуя некоторую сплошную, целостную цепочку «настоящих» событий. Другими словами, согласно квантовому подходу любое элементарное событие, находящееся в хронологическом интервале между двумя другими элементарными событиями психологического настоящего, также должно принадлежать психологическому настоящему. В действительности это было не так ... У большинства опрошенных события их настоящего хронологически следовали не друг за другом, а чередовались с событиями «ненастоящего». Гипотетические «кванты» оказывались как бы «пористыми» – между событиями настоящего нередко находилось несколько событий, к настоящему не принадлежащих.

Несмотря на то, что события принадлежат хронологическому прошлому, они ещё не утратили своей актуальности, поскольку связанное с ними событие находится в хронологическом будущем... Вспомним теперь о парадоксальной ситуации отнесения к психологическому настоящему событий, целиком принадлежащих хронологическому прошлому или будущему...»

3.4. Ада Лавлейс и схема ХТН

Кто придумал алгоритм как пошаговую инструкцию последовательных операций – нам не известно. Египетские жрецы XVII века до нашей эры при умножении чисел на папирусе действовали вполне пошаговым образом. Пожалуй, главное отличие аль-Хорезми – это позиционная система счисления. Речь шла всего о нескольких операциях – сложения, уменьшения на единицу, умножения двух величин, а также их деления пополам и на три части. Последние две операции позволяли извлекать квадратные и кубические корни – почти за тысячелетие до методов Исаака Ньютона; археологи говорят, что дети в школах Древнего Шумера заучивали наизусть таблицы квадратных и кубических корней. Алгоритмы аль-Хорезми в его системе счисления

оказались поистине революционными, поскольку сделали вычисления доступными широким слоям минимально грамотного сословия, по-видимому, забрав эту привилегию у храмовой элиты. По скорости схема аль-Хорезми видимо сильно уступала жреческим таблицам. Прочесть результат – мгновенно, а считать столбиком – утомительно и этому надо ещё поучиться. Алгоритм фактически оказался «свёрткой» во времени больших таблиц функции. В компьютере вопрос, однако, непростой – что быстрее, вычислить или извлечь. Если можно вычислить, то надо вычислять. Для многих программистов неожиданным оказывается результат простейшего эксперимента на обычном компьютере. Для таблицы умножения трёхзначных чисел из 1 млн строк извлекать результат даже из оперативной памяти оказывается на порядок дольше, чем вычислять на процессоре. В живых сетях не замечено никаких таблиц и никаких функций. Заметим, что алгоритм в этом варианте уже демонстрировал свёртку-развёртку пространства во времени. Например, для умножения трёхзначных чисел вместо таблиц с миллионом строк достаточно хранить табличку из 81 строки с обложки школьной тетрадки. А если вслед за Дж.Булем использовать двоичную систему счисления, то нам достаточно таблички из четырёх строк. По поводу системы счисления, то есть правил изображения чисел, заметим следующее. Жрецы Древнего Египта пользовались десятично-двоичной системой! Числа изображались в десятичной системе, а операции проводились с предварительным переводом – разложением по степеням двойки. Но не будучи позиционной, такая система действительно требовала известных «компетенций» – таблиц перевода. Дело не только в том, что в системе счисления жрецы на тысячелетия опередили Джорджа Буля и фон-Неймана. Если говорить о размерах хранимых аль-Хорезми таблиц, то они были громадными – это синусы малых углов, которые дожили до другого узбекского мыслителя – Улугбека, который продолжил их чуть ли не до двенадцатого знака после запятой.

Тезис Чёрча-Тьюринга-Дойча. Этот тезис по-прежнему именуют просто тезисом Чёрча. Однако важнейшее добавление состоит в дополнении Дойча – машина Тьюринга алгоритмически универсальна, если не считать непрерывность и бесконечность. Заметим, что сам вопрос о существовании разрывных функций был дискуссионным среди математиков [15].

Алан Тьюринг распространил пошаговую схему на любые вычисления с использованием булевских функций и двоичной системы счисления. Но Дж.фон-Нейман в то же время обратившись к живым системам, обнаружил существование двух типов процессов в нервной сети – цифровые и аналоговые. В работе А.Т. Филиппова [16] результат срабатывания нейрона представлен не численной величиной, а потоком электрических импульсов: «... выпускается подряд целая очередь или залп импульсов...». Такая пулемёт-

ная очередь движется по аксону от одного нейрона к другим. Такие же серии оказываются на входах нейронов. Наши дальнейшие размышления основаны на анализе этих серий и временных соотношений задержек в элементах и каналах сети.

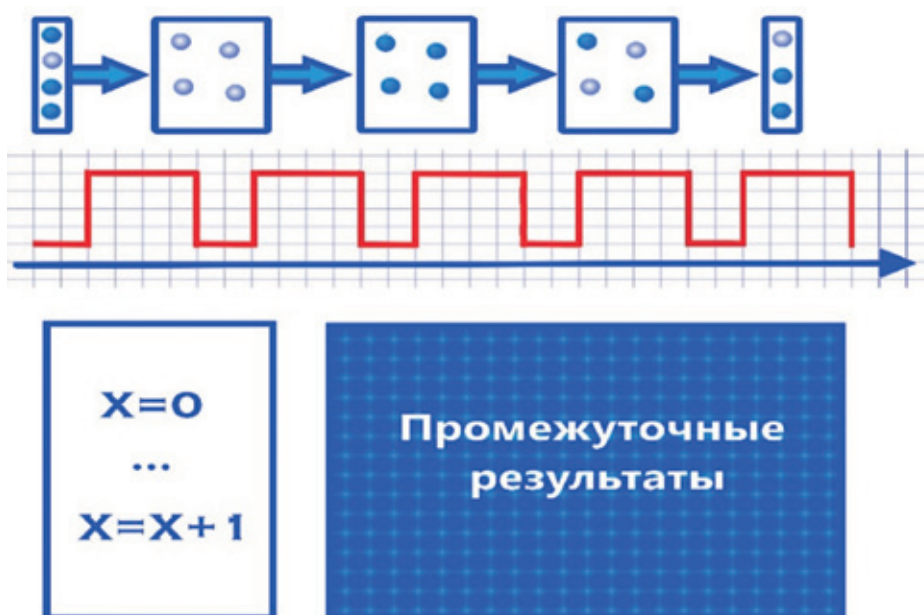


Рис. 4. Схема работы компьютера и памяти. Нам предстоит обойтись без процессора, хранимого программного кода и промежуточной рабочей памяти.

На Рисунке 4 время «движется» слева направо по дискретным шагам, на каждом из которых происходит синхронизация всех переходных процессов во всех объектах, участвующих в вычислениях; это подразумевается у аль-Хорезми и явно используется в схеме Тьюринга. Слева – вектор исходных данных, например, датчики; справа – вектор результата. Темные и светлые овалы – двоичные величины. Три прямоугольника изображают последовательные состояния объектов – атомарных ячеек памяти. Заметим, что никаких законов сохранения при этом нет – все нули на одном шаге могут превратиться во все единицы и обратно, даже если их миллиарды. Какие энергозатраты и выделение тепла при этом возникают – знают конструкторы. Ничего подобного в природных нейронных сетях нет. Программный код и промежуточные результаты – также хранятся в памяти машины; это – один из основных моментов в машине фон-Неймана первого рода. Ступенчатая функция внизу – генератор тактовой частоты.

Программный код может быть записан на одном из большого разнообразия языков. Все они как правило теоретически эквивалентны языку машины Тьюринга, время и работа в которой также протекают дискретными шагами. Большинство привычных нам конструкций языка являются избыточными. Но сам язык, оставаясь универсальным, может не содержать даже таких при-

вычных операторов как присваивание, переход, сравнение и цикл (в языках LISP и РЕФАЛ). Два неписанных принципа тем не менее остаются – тотальная синхронизация и хранение программного кода в памяти. В природных сетях не обнаружено ни того, ни другого.

Синхроимпульс и триггер в машине фон-Неймана. Физики столкнулись с проблемой синхронизации переходных процессов всех элементов в пошаговой алгоритмической схеме и законами сохранения Лавуазье-Ломоносова – проблемой теплоотвода. Перед корпусами МГУ можно увидеть гигантские установки кондиционеров для супер-ЭВМ «Ломоносов» и «Чебышёв». Инженеры таким образом решают проблему, которую не признают математики – законы сохранения.

Основой физической реализации синхронной схемы является триггер. При всём разнообразии их типов можно изобразить общую картину переходных процессов в них – смены их состояний с нуля на единицу и обратно, или низкого и высокого уровня потенциала. Особенность работы триггера и схемы Тьюринга в том, что смена состояния длится определённое время, в рамках которого состояние элемента не определено, а до и после – однозначно, постоянно и может храниться неограниченно долго.

Триггер имеет две основные функции – смену состояния и считывание. Подразумевается и функция хранения одного из состояний на неограниченное время. В представлении математиков считывание – «мягкая» операция, неограниченно повторимая. Физически это неразрушающее считывание. На инженерном уровне – это сложнее, чем смена состояния. Считывание – это смена состояния на противоположное и последующее повторение для восстановления исходного уровня. Куда исчезает предыдущее состояние знают инженеры – через вентилятор в окружающее пространство.

На работу триггера есть по крайней мере три точки зрения – алгоритмическая, схемотехническая и практическая.

Алгоритмическая – это дискретная функция, со значениями 0/1. Схемотехника учитывает переходные интервалы, и вид становится как на рисунке 4. Формальное описание смены состояния триггера – дискретный скачок. Физическая же реальность – наличие значимых по времени интервалов переходных процессов. Что касается переходных процессов в триггере, то ничего определённого про них нельзя сказать – нет даже гарантии монотонности функции состояния во времени.

На рисунке 5 изображён уровень заряда в триггере при смене его состояния. В момент T_1 начинается процесс смены, через время Dt триггер переходит в состояние повышенного уровня. При обратной смене уровня на низкое значение также уходит некоторое время Dt на переход. Электронные схемы гарантируют, что до момента T_1 триггер находится в состоянии одного уровня, а через Dt – другого. Что происходит в течение интервала време-

ни Dt – неизвестно! Величина интервала Dt и диктует возможную тактовую частоту, то есть производительность компьютерной схемы.

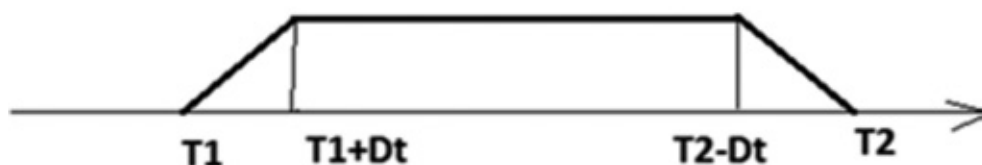


Рис. 5. Упрощённая форма электрического импульса в проводнике. Наклонные линии фронтов могут иметь самую непредсказуемую форму.

С математической точки зрения взаимное ожидание синхронизации событий в разных участках схемы – «вырезанное» время, а электрически – это взаимное притормаживание одних переходных процессов по отношению к другим. Физически выравнивание событий во времени реализуется не за счёт ускорения отстающего по времени процесса, а за счёт торможения опережающего.

Физически синхронизация означает торможение работы, а информационно – распад фазовой картины промежуточных состояний.

Стандартное начало описания нейронной сети – это ‘множество клеток, связанных друг с другом’. Под множеством все мы понимаем примерно одно и то же, а под связями традиционно математики понимают рёбра графа. И уже в этом математические представления расходятся с нейрофизиологами. Вспомним Сеченова – сеть состоит из нервных волокон, соединённых клетками! То есть в работах школы Сеченова первичными считаются каналы связи, а сами клетки-нейроны – лишь результат их встречи. В математических работах строятся уравнения и алгоритмы, описывающие состояния нейрона в зависимости от его входов. В представлении физиологов результат работы сети – мышечная активность, то есть электрическая волна, возникающая на нервном волокне в зависимости от волн в связанных волокнах. Клетки-нейроны, связывающие волокна-аксоны, могут считаться параметрами реакции. Разница в этих представлениях – разное понимание времени у физиологов и математиков. Для математиков время в компьютере течёт как в метрономе – то есть по шагам, ‘дискретно’. На каждом шаге состояния всех элементов пересчитываются к следующему шагу и мгновенно изменяются на новые величины. Этот парадокс приводит к коллизии при построении модели – где-то надо хранить исходные и промежуточные результаты вычислений, чтобы они были корректными. Для физиолога объект – это волна в канале, в виде которой и распространяется результат. Как уже говорилось, нет никакой промежуточной памяти, нет процессоров, вычисляющих значения выхо-

дов по входам. Что ещё невероятнее для айтишника – нет синхронизации, нет пресловутых «шагов», как нет и мгновенных смен состояний. Вообще волны по каналам движутся по компьютерным понятиям с черепашьей скоростью и иногда на астрономические расстояния – до метра длины аксона вместо нанометра в микроэлектронике – в миллиарды раз дальше! В недавние времена даже стала сомнительной электрическая природа нервного возбуждения. По некоторым представлениям волна в нервном волокне – это так называемый солитон, то есть волна специального вида, описываемая дифференциальными уравнениями третьей степени, которая может насквозь проходить через другую волну, обгоняя её или при встрече ней. Обнаружены волокна, по которым импульсы идут одновременно в двух направлениях! – электрический проводник не может пропускать ток одновременно в обоих направлениях. Это механические волны в мышечной ткани или жидкостные – обыкновенное цунами. Волновая картина гуляющих по каналам сети волн – это и есть объект внимания для нейрофизиолога. Важен процесс их зарождения, интерференции, затухания и влияние на саму структуру сети при её адаптации. В каких-то ситуациях поступление импульса от ткани в канал равнозначно его поступлению из клетки. Это пример того, что мышечная активность может быть результатом как внешнего воздействия через периферийную нервную систему, так и волевого усилия в центральной нервной системе. Это же проявляется в неотличимости галлюцинации от реальности.

Отметим здесь же, что входной импульс может иметь два варианта. Один – это аналог акупунктуры, когда импульс поступает точно, через один рецептор. Очевидно, что мы не так получаем основной поток воздействий среды. Наш глаз непроизвольно совершает быстрые движения – мы как бы чиркаем по объекту, прикосновение к коже информативно скорее в движении по ней, ушная раковина – не прямая труба, а индивидуально сформированная замысловатая структура, обеспечивающая временные сдвиги точечных воздействий. Можно сказать, что элементы распознающей цепочки получают входные импульсы с некоторым сдвигом во времени. Это может приводить к «закорачиванию» реакций – импульс не сможет распространиться к соседней клетке, так как туда уже поступит импульс от соседнего входа. Математическая модель позволяет многократно проводить одни и те же вычисления без следа на сети. Живая сеть устаёт, и ей нужно значительное время на сон, чтобы усвоить или отвергнуть результат внешнего воздействия – в это время в условиях тишины и покоя активность сети несколько не снижается, она адаптируется, возможно с реорганизацией её собственной структуры. Происходит рост клеток, отмирание ненужных связей и рождение новых.

3.5. Коннектом

Коннектом и коннектомика – это подход в нейроинформатике, согласно которому природный мозг представляет собой сеть из попарно соединённых элементов-нейронов. Изучение таких связей путём экспериментов ведётся несколько десятилетий с составлением соответствующих карт. Аналогичные работы ведутся и по картированию важнейших ресурсов интернета. Возникающие при этом аналогии не могут оставить нас равнодушными.

При разработке первых же моделей нейронных сетей использовались также геометрические представления о бинарных связях элементов. Трактовка сети как графа видна на Рис. 6. Это – распространение схемы ХТН с пошаговым временем. Бинарные отношения могут быть направленными и граф связей сети являться деревом с одним выходом или лесом, если выходов несколько. На Рис.6 связи предполагаются направленными слева направо как на верхних стрелках.

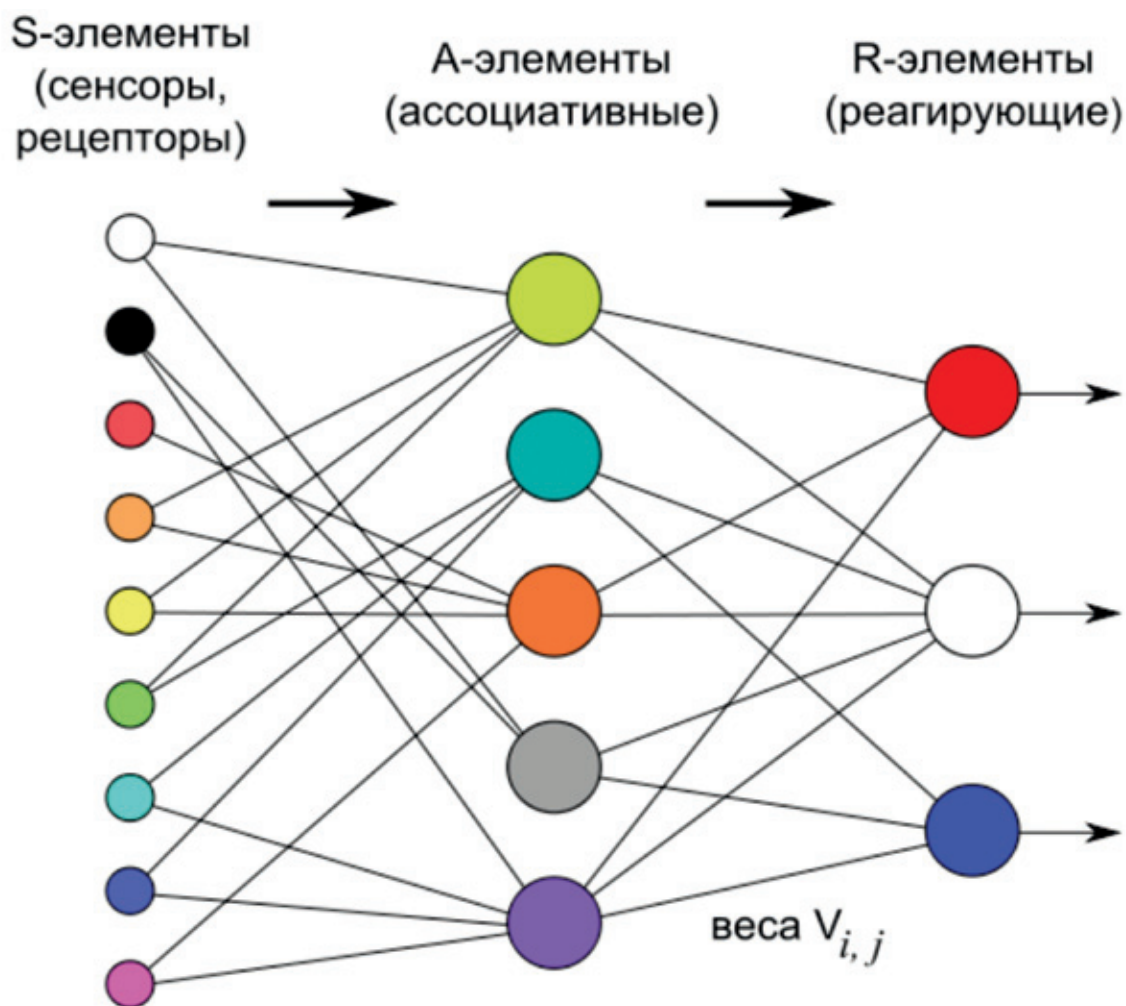


Рис. 6. Коннектомный подход

4. Немного из нейрофизиологии

Немного – по нескольким причинам. Прежде всего, нашей целью не является воспроизводство известных механизмов работы природной нейронной сети. Про эти механизмы имеется достаточно обширная учебная литература и большой поток научной информации. Практически непрерывно появляются всё новые и новые экспериментальные факты, развивающие и меняющие наши представления о природе таких систем. Но следует признать и другое – монографии и учебники по нейробиологии, изданные на русском языке, отстают как минимум лет на 10, что может иметь самые разные причины. Следуя подсказкам классиков, искусственные сети могут быть построены на совершенно иных принципах.

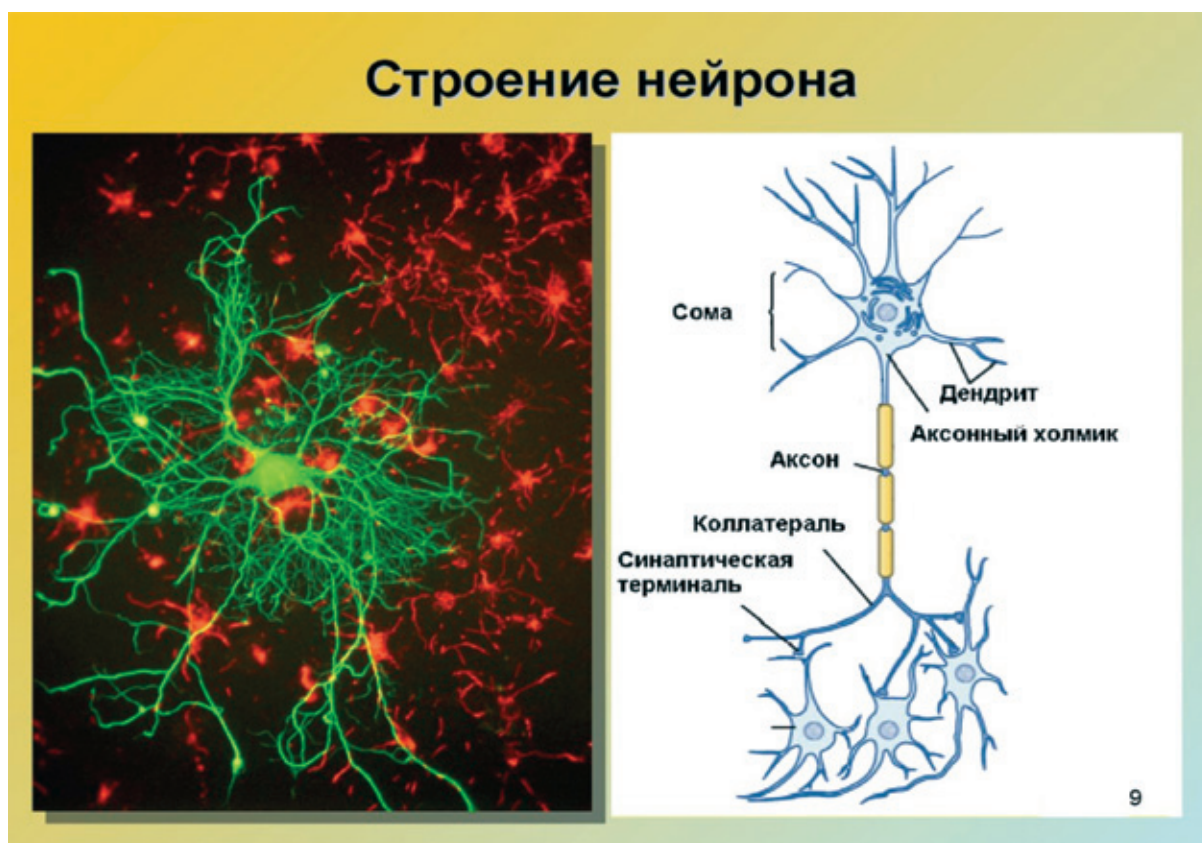


Рис.7. Группа нейронов и их схема.
(<http://tainoe.info/kak-rabotaet-mozg-chast-1-dlya-chego-nuzhen-son.htm>).

На Рис.7. Изображена группа нейронов и их схема. Показана миелиновая оболочка аксона и два типа разветвлений – самого аксона на две части с оболочкой, а также более густые древовидные ветви окончаний. Видно также, что дендриты занимают значительное пространство по сравнению с телом – их суммарная площадь поверхности в трехмерном пространстве может занимать до 97 процентов площади поверхности нейрона и дендритов вместе. Нейрон состоит из тела клетки, или сомы, одного длинного вет-

вящегося отростка, называемого аксоном, а также множества (от 1 до 1000) коротких сильно ветвящихся отростков – дендритов. Также на схеме обозначены ядро клетки, ветви аксона, миелиновое волокно, перехваты.

В реальности аксоны многих нейронов связаны в настоящие пучки, в которых импульсы оказывают существенное влияние друг на друга.

Что можно считать аналогом элементов и состояний в синхронных моделях? Скорее всего – тело нейрона и уровень заряда в нём. В то же время эксперимент показывает скорее электрические токи в аксонах. В разделе о работах А. Ухтомского мы вернёмся к этому вопросу. Вместо значений состояний элементов нас будут интересовать потоки в каналах. Дж. фон-Неман признавал, что результат срабатывания нейрона – не переход в новое состояние, а серия электрических импульсов в выходящем из него аксоне. Такая серия характеризуется числом импульсов и их перемещением, то есть координатой и скоростью движения по аксону.

Дж. фон-Нейман [17] обратил внимание на то, что процессы в живых нейронных сетях могут быть описаны тремя подходами – электрическим, химическим и механическим. Химический или молекулярный подход основан на том, что по сети ходят волны из ионных потоков – в основном калия, натрия, магния, хлора, что можно рассматривать как электрические явления. Ионы металлов несут положительные заряды, ионы хлора – отрицательные, выполняющие роль торможения. С другой стороны, нейроны и каналы, а также среда, в которой они существуют – вполне материальные объекты, описываемые законами механики. Мы остановимся на электрической метафоре зарядов. В ней тела нейронов будут аналогами конденсаторов, а каналы связи – аналогом сопротивлений.

Вместо скоростей распространения импульсов можно говорить об их частоте. В этом случае работают математические инструменты описания механических колебаний и волн. Однако это же заставляет использовать модели безоболочных каналов – как струн или поверхностей твёрдых или жидких сред. Академик Алексей Ухтомский специально занимался теорией колебаний и разложением функций в ряды Фурье в надежде описать колебательные процессы в нейронах. В те годы не было достаточно распространённых дискретных методов.

Несколько фактов, которые мы будем использовать в наших моделях. Нейроны окружены мембранами, через которые проникают в поперечном направлении положительные ионы калия и натрия. При возникновении возбуждения это порождает продольные волны в аксонах. Скорости распространения электрического импульса в аксоне пропорциональны диаметру нервного волокна (или корню из диаметра – в зависимости от природы аксона). Аксоны могут иметь оболочку из миелина или не иметь

её. Слова миелинизированные и немиелинизированные мы для простоты заменим на оболочные и безоболочные. Оболочка сокращает рассеяние проходящих зарядов и увеличивает скорость и присуща более развитым организмам. Оболочка делит аксон на фрагменты, напоминая сосиски. В большинстве работ принимается безоболочная модель, которая позволяет использовать хорошо развитые методы описания прохождения волн. Мы, наоборот, примем оболочный вариант канала. При этом заряд распространяется не в виде непрерывной волны, а движется перескоками с одной точки в другую. Эти точки называются перехватами Ранвье. Заряд может иногда и перескакивать несколько перехватов. Дискретность распространения электрического импульса по аксону имеет ещё одно удобство в применении математических методов. Каждый импульс состоит из большого числа ионов, поэтому времена перескока по перехватам – случайные величины. Суммарное время прохождения импульса по цепи нейронов – сумма случайных величин. А время многократного обращения импульса по замкнутому контуру – тоже случайная величина. Мы сможем использовать статистические методы благодаря единственному допущению – времена переходных процессов в материальной среде аксонов – случайная величина, имеющая одинаковое для всей сети распределение.

Базовой операцией в физическом (электрохимическом) смысле является непрерывный обмен трёх ионов натрия на два иона калия через громадное количество мембранных каналов.

Времена циркуляции импульсов определяются задержками в телах нейронов и геометрией сети, то есть длинами фрагментов, их сечениями и связями. Элементами задержек пороговой природы в природной сети являются синапсы, шипики на дендритах, аксонные холмики.

Мы будем говорить про геометрию, хотя для математиков речь идёт скорее о топологии, в которой изучаются структуры самой разной сложности и природы.

С точки зрения геометрии связей нам важно явление ветвления аксонов. Есть два вида ветвления. Будем называть их ответвлениями и разветвлениями. Ответвление – это отход самостоятельного фрагмента от основного ствола аксона. Разветвление – это дробление аксона на совокупность более мелких каналов. Разветвления присущи окончанию аксона – перед его подключением к нейрону-приёмнику. Разветвления увеличивают скорость переноса заряда в принимающий нейрон. Ответвления обеспечивают альтернативные пути циркуляции зарядов.

Что происходит с импульсом в точке ответвления – не очень ясно. Импульс может поделиться между стволом и ответвлением, может полно-

стью пойти по ответвлению, а может и вообще исчезнуть. Мы в моделях должны допустить все возможные варианты – имитационная модель покажет результаты.

Принципиальный вопрос – однородность сети. Как правило, математические модели используют неявное предположение об однородности элементов и каналов, когда отсутствует функциональное различие фрагментов сети. Ограничимся лишь одним вопросом – существованием или отсутствием управляющего центра сети, то есть её фрагмента, выполняющего такую роль. Можно сослаться здесь на работы В. Крюкова [18], в которых такая роль отводится гиппокампу. Теория Доминанты А. Ухтомского позволяет считать очаг достаточно длительного возбуждения аналогом такого органа.

Ещё один момент игнорируется разработчиками. Это олигодендроциты, то есть пучки нервных волокон. Аксоны связаны в относительно небольшие группы (до 30 штук) чем-то вроде мостов-перемычек. Это прежде всего физическая фиксация геометрической структуры связей в довольно вязкой мозговой среде. Такие мосты связывают каналы разных контуров, обеспечивая потенциальную возможность ассоциативных и иерархических связей. Об этом косвенно упоминает и Дж. фон-Нейман. Мы явно введём в моделях такой объект как пучок. Это – явная связь сети как информационного объекта с физической тканевой средой.

Связь с тканевой средой организма выполняют и астроциты, обеспечивающие наряду с физической фиксацией объектов в пространстве также жизнеобеспечение сети – подпитку и канализацию. Астроциты мы исключаем из модели в силу тезиса о возможности существования альтернативных механизмов молекулярной (химической) природы сети. Отдельная тема – поверхностные волны на телах нейронов. У нас сегодня нет убедительного объяснения однополярной природы нейрона – почему дендритов много, а аксон один и как реализуется пороговая природа срабатывания нейрона.

5. ВРЕМЯ КАК НЕМАТЕРИАЛЬНАЯ ЗАПОМИНАЮЩАЯ СРЕДА

5.1. Три поросёнка и сетевые протоколы.

Попробуем на простейшем примере показать информационную ёмкость пространственно-временной развёртки событий.

Вспомним хорошо известных Трёх поросят. Ниф-Ниф, Нуф-Нуф и Наф-Наф.

Сколько комбинаций можно построить из N материальных элементов? Два в степени N .

А сколько вариантов их упорядочить в строю? $N!$ – факториал числа элементов.

А теперь предположим, что все наши поросята – дети одной мамы. Как могут сложиться их судьбы от рождения до исчезновения? Возможен, например, такой вариант их совместной судьбы в истории хозяйства.

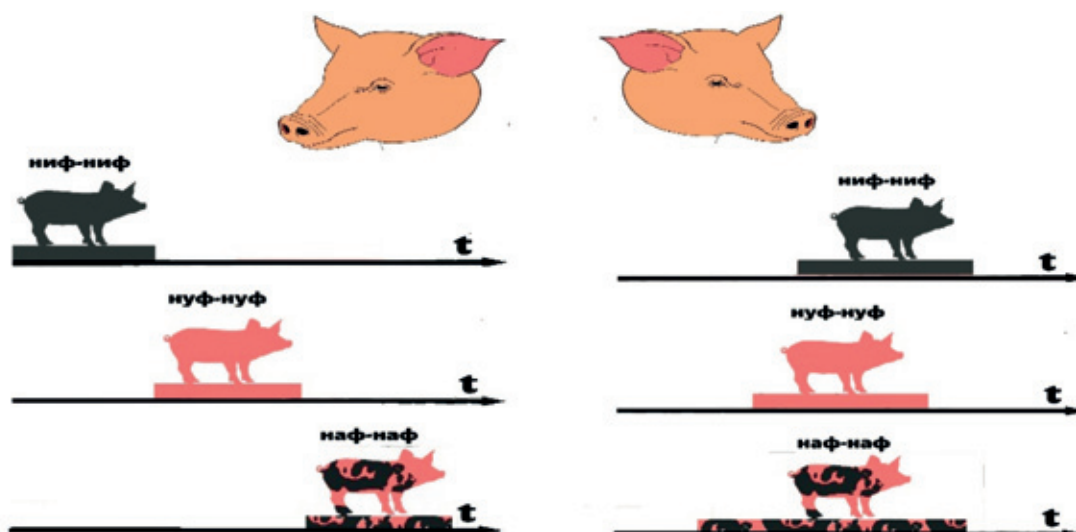


Рис.8. Исторические судьбы трёх поросят.

На левом рисунке (Рис.8) показаны времена жизни всех трёх поросят. Мы видим, что Нуф-Нуф родился, когда ушёл Ниф-Ниф, а Наф-Наф родился после ухода Нуф-Нуфа.

Чтобы показать принципиальное отличие временной развёртки от пространственной, рассмотрим другой вариант (правый рисунок).

В этом случае первым появился на свет Наф-Наф, потом Нуф-Нуф, за ним уже и Ниф-Ниф. Первым не стало Нуф-Нуфа, потом – Наф-Нафа, и после этого – Ниф-Нифа.

Мы видим принципиальное отличие времени от пространства материальных тел – элементы могут быть вложены друг в друга и переходить границы друг друга (время Кроника).

Кто помнит начала комбинаторики, сможет убедиться в том, что для N элементов возможно $(2N)!/2^N$ вариантов

Рассуждения примерно таковы. Для N элементов есть $2N$ границ (начала и окончания каждого). Их можно упорядочить $(2N)!$ способами. При этом надо исключить некорректные комбинации, когда окончание предшествует началу каждого элемента. Такие нарушения могут быть в любом подмножестве элементов, число вариантов которых – 2^N .

Для $N=3$ возможны 90 вариантов упорядочивания во времени, для $N=4$ будет 2520, для $N=5$ получим 113400 способов упорядочения, что сравнимо с размером словаря естественного языка. При восьми элементах (это число проводов в простейшем канале байтового обмена) число

комбинаций – 81 729 648 000. Уже для $N=10$ число комбинаций трудно даже записать. Видна астрономическая ёмкость по сравнению с пространством.

Если трактовать жизни поросят как электрические импульсы, идущие по совокупности проводников, мы и убеждаемся в фантастической информационной ёмкости живой памяти, состоящей всего из нескольких нейронов.

5.2. Сетевые протоколы:

неважно – что передавать, важно – в каком порядке.

Большинство из нас при работе в мировой сети привыкли явно или неявно пользоваться сетевым протоколом TCP/IP. Не вдаваясь в детали, напомним, что при этом наше сообщение режется на пакеты примерно по килобайту. Вся совокупность пакетов по очереди выдаётся в сеть. В заголовке каждого пакета стоит его линейный порядковый номер. Продвигаясь любыми маршрутами, с повтором потерь, все пакеты по достижении пункта назначения, собираются на нём в единое целое соответственно тому линейному порядку, в котором они были нарезаны на источнике. Но стандартная модель сетевых протоколов OSI включает и более высокий, так называемый сеансовый уровень, при котором сеть гарантирует сохранение того же порядка во времени доставки пакетов, в котором они выходили из источника; при диалоге второй вопрос от сервера должен формироваться после ответа на первый.

А теперь предположим, что на источнике и приёмнике мы устанавливаем один из вариантов порядка во времени – скажем, второй пакет передаётся между седьмым и пятнадцатым. Дешифровка порядка даёт выбор из громадного количества вариантов. Технологически это значит, что при передаче пакетов фотографии нашей бабушки мы дополнительно передадим некоторую информацию, не занимающую ни одного бита. Никакой криптографии и шифровки при передаче по сети, бессмысленность перехвата в промежуточных точках маршрута. Перехват заморозит, сомнёт временную картину и тем самым уничтожит содержимое! При этом мы не нарушаем никакие правовые нормы об открытой/зашифрованной передаче. Мы можем откровенно паразитировать на чужом трафике совершенно незаметно, хотя и с замедлением для того, кто за него платит. А передавать совершенно неважно что – как и в живой памяти, где передаются одиночные импульсы. И это даже без традиционных криптографических технологий. Перехват пакетов с целью сборки передаваемого объекта приведёт в силу синхронизации к полному уничтожению – аннигиляции переданной во времени информации.

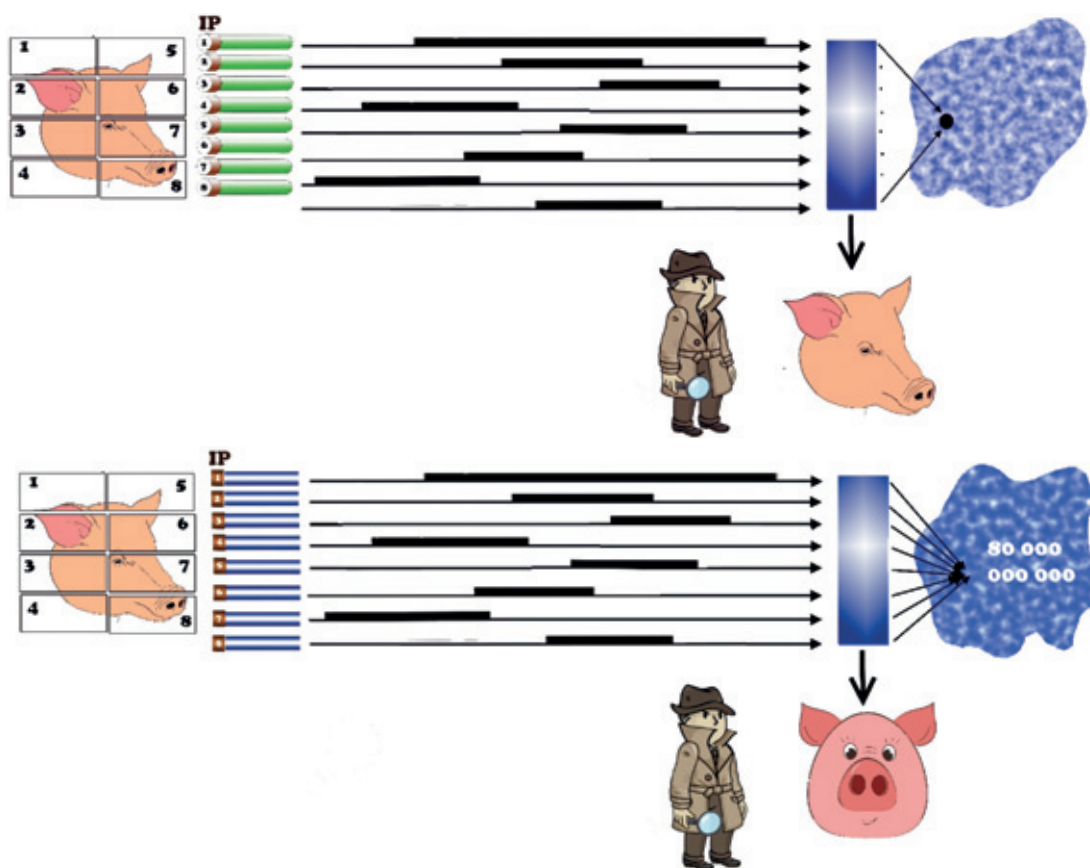


Рис. 9. По сети движутся не только фрагменты данных, но и временные сдвиги, не изображаемые кодами. Перехват требует синхронизации, что приводит к потере передаваемой информации.

Разумеется, плата за такие эффекты – значительное увеличение времени передачи, что, однако, может быть облегчено специализированными электронными системами.

5.3. Автоматическая классификация.

Если отвлечься от шпиономании, то надо обратить внимание на такой замечательный факт. Для 8 каналов мы не просто передаём и восстанавливаем элемент из примерно 80 млрд вариантов, мы обеспечиваем динамическую их классификацию, в каком-то смысле натуральную, порождаемую входным потоком. Действительно, все сигналы, идентичные в смысле взаимного расположения передних и задних фронтов, относятся к одному классу ассоциаций.

Простейший вариант запоминания – фиксация состояния параметров объекта во времени и его размещение в материальной запоминающей среде компьютера. Это обеспечивает и простейший вариант распознавания – наличие или отсутствие объекта в памяти.

Для эффективного хранения больших объёмов данных, а также для

более сложных реакций системы (принятия решений, коммуникаций) необходима классификация объектов, то есть их разбиение на классы, которые, в свою очередь, могут образовывать достаточно сложные структуры. Наиболее распространённые варианты – плоское разбиение всего набора объектов на непересекающиеся множества по каким-то критериям. Более сложный вариант – таксономия [19], когда классы образуют иерархии. Исторически такие системы классификации зародились после богословия в биологии, языкознании, археологии, документообороте. Более современные сферы – это автоматическое распознавание образов в системах принятия решений.

При использовании евклидовых метрик и декартовой системы пространственных координат задача выглядит как разбиение множества точек многомерного пространства на близкие в каком-то смысле облака. При отказе от таких метрик (правильно говорить иногда о топологии пространства вместо геометрии) механизмы выглядят иначе – как в случае психологического времени у А.Кроника или в асинхронной банке Горбаня.

Есть несколько особенностей в таких системах. Прежде всего – проблема выработки критериев разбиения на классы и их иерархию. Второе – размытость множеств, когда вновь появившийся объект может быть отнесён к нескольким классам или его принадлежность к классу неоднозначна. В нейроинформатике ситуация ещё сложнее – работа системы происходит в двух чередующихся режимах – обучение, обычно с участием эксперта-оценщика и последующее использование выработанной или скорректированной системы классификации. С точки зрения классификации принципиальное отличие нейросетевых подходов от традиционных областей применения – отсутствие явно выраженных критериев и алгоритмов. Мы можем не знать и не пытаться понять механизм классификации как результат обучения сети, нам важна по возможности возрастающая во времени эффективность и адекватность распознавания. Особенно хорошо этот метод чёрного ящика проявляется в современных системах человеко-компьютерных интерфейсов.

Каковы особенности классификации объектов во времени? Воспользуемся примерами про трёх поросят и перехват информации в сетях. Будем использовать следующую нотацию для обозначения комбинации интервальных событий во времени. Каждый интервал имеет начало и окончание; в дальнейшем при рассмотрении размытых интервалов эти границы тоже окажутся интервалами. Для каждого из поросят обозначим ось его жизни натуральным числом. Сейчас в нашем рассмотрении по каждой оси случается лишь два однозначно упорядоченных события – возникновение и исчезновение.

Условимся картинку из первого поросячьего примера обозначать как 1,1,2,2,3,3. Это означает, что по второй оси оба события произошли после обоих событий по первой оси и перед обоими событиями по третьей оси. В такой нотации второй вариант с поросятами запишется как 3,2,1,2,3,1.

Очевидно, что каждая из таких комбинаций образует на самом деле класс временных развёрток событий, порядок которых обозначается одинаковыми комбинациями. Все процессы, которые дают одинаковый порядок по осям, относятся к одному классу.

Отметим несколько особенностей такой классификации.

Прежде всего – *естественность*. Не используются никакие алгоритмы вычислительного характера.

Динамический характер – не нужен период обучения и оценки. Классы формируются по мере поступления событий.

Иерархичность – каждый класс может быть отнесён к объемлющему классу при совпадении порядка по части линий. Снижение размерности пространства при переходе к объемлющему включающему классу.

Полиархия – возможность принадлежности к нескольким объемлющим классам как нарушение материальной физической пространственной природы.

Размытость – если передний и задний фронт по каждой линии представляется интервалом (как в физическом триггере), то принадлежность элемента к классу также размыта.

Именованье класса сравнительно короткой упорядоченной цепочкой величин вместо формул и критериев выглядит потенциально пригодным для формирования геометрии-топологии из элементов и каналов нейронной сети, которая соответствует такой цепочке, то есть может её гипотетически распознавать и порождать. Такие фрагменты могут образовывать естественные иерархии и ассоциации. В этом случае нет необходимости прямой фиксации поступающих сигналов в виде массива данных с размещением в конкретном месте материальной запоминающей среды.

Необходимо сделать замечание о физических ограничениях такого механизма классификации. Есть ограничение на общую длительность сбора сигналов по всем каналам, а также на относительную долю длительности переходных интервалов и периодов рефрактерности, что означает вполне вычисляемую предельную ёмкость набора каналов. При компьютерном моделировании асинхронной нейронной сети это физическое ограничение – наряду с другими материальными пространственными снимается.

6. К построению асинхронной модели

6.1. Геометрия сети: нейрон, канал, аксон, ветвления, пучки.

Элемент-нейрон имеет тело, входные буферы и один выходной буфер. Выходной буфер – аналог аксонного холмика. Входные буферы играют роль дендритов. Поскольку процессы, происходящие в дендритах, очень сложны даже на первый взгляд, мы пока ограничимся лишь одной их особенностью – задерживать приходящий к ним импульс. Как тело, так и буферы имеют статический параметр – ёмкость и динамический параметр – значение (уровень) заряда в них. У тела элемента есть ещё два параметра – нижний и верхний пороги.

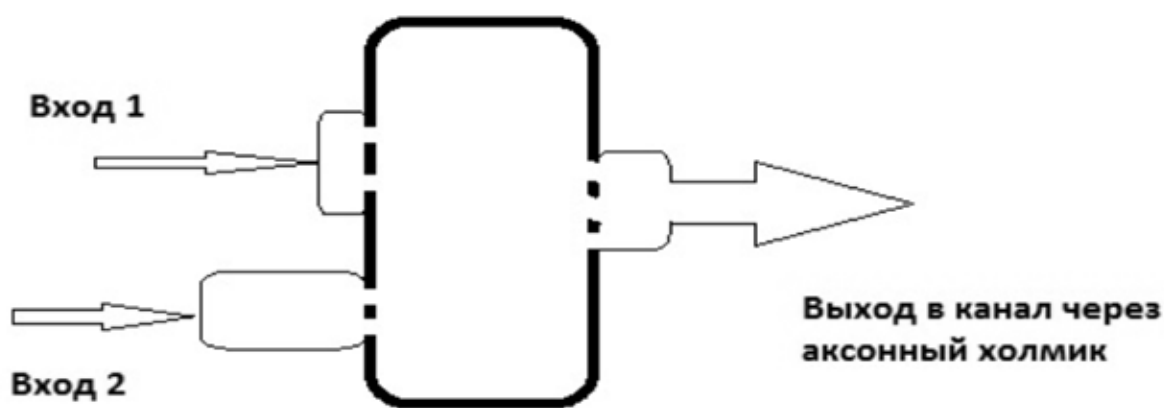


Рис 10. Элемент-нейрон с двумя входными, одним выходным каналом и аксонным холмиком.

На рисунке 10 изображён элемент, для которого входной канал разветвляется перед телом. Пусть есть два соответствующих буфера, ёмкости которых равны 3 и 5 единицам. При поступлении заряда по каналу каждые три единицы времени будет разряжаться первый буфер, каждые пять условных единиц – второй. Очевидно, что каждые 15 единиц времени будет происходить наложение двух событий – и в тело элемента будет поступать суммарный заряд двух буферов. Аналогичное явление будет происходить и в том случае, когда к телу подходят разные каналы. При наличии нескольких буферов одного или нескольких источников мы получим более замысловатую картину, когда пики разной величины будут наблюдаться через интервалы времени, равные наименьшим общим кратным ёмкостей любого подмножества буферов. В нашей голове таких буферов – до нескольких тысяч у каждого нейрона.

Будем различать два варианта ветвления канала – ответвление и разветвление. Ответвление – это одиночный «отросток» от основного канала-ствола. Все ответвления геометрически упорядочены вдоль ствола-основного канала. Разветвление – это «разделение» или «расщепление»

исходного канала на совокупность отдельных ветвей с общей точкой, после которой канал как целое не существует. Разветвления характерны для окончания канала перед его входом в принимающий нейрон.

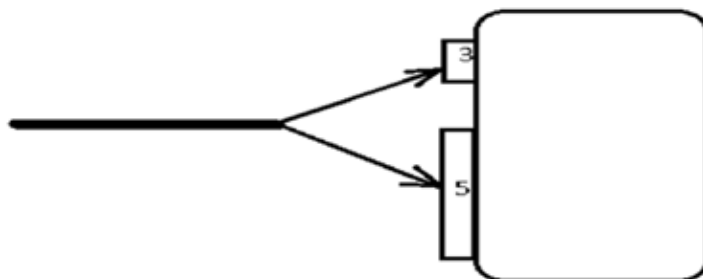


Рис 11. Разветвление аксона на его окончании. Цифры 3 и 5 – заряды в принимающих буферах.

Буферы отделены от тела аналогами мембран и синапсов, задерживающими поступающие импульсы с накоплением и пропускающими заряд в одном направлении – в тело нейрона. Выходной буфер дозирует заряд, выдаваемый в выходной канал порциями. Порция и соответствует одиночному импульсу.

Выходной канал нейрона связывает его с произвольным числом элементов-приемников и имеет ветвящуюся древовидную структуру. Точки ветвления канала не являются элементами-нейронами сети, ветви канала могут начинаться в среде как нейроны сенсорной системы и могут заканчиваться в среде – аналог моторных нейронов мышечной ткани и желёз. Ветвь канала может вести к другому каналу минуя нейрон; это аксон-аксонная связь.

Канал и каждая его ветвь имеют два основных статических параметра – сечение, от которого линейно зависит время прохождения импульса по ветви, а также длину.

Работа сети заключается в совокупности параллельно и независимо развивающихся процессов во всех её частях – элементах, буферах, ветвях. Мы предлагаем для начала самые простые алгоритмы, основанные на физико-химических аналогах реальных процессов.

Элемент находится в неактивном состоянии, или состоянии покоя, если уровень заряда в нём не превышает верхнего порога. Если элемент находился в состоянии покоя, и произошёл приём импульса из входного буфера с превышением порога, то элемент активируется. Входной буфер находится в состоянии покоя, если уровень заряда в нём меньше его ёмкости. Канал находится в состоянии покоя, если в нём нет движущихся зарядов. В активном состоянии из тела элемента происходит выброс заряда в выходной канал порцией, равной ёмкости выходного буфера. Если

уровень заряда в теле элемента падает ниже нижнего порога, то элемент переходит в неактивное состояние. Ненулевое значение нижнего порога удобно для сохранения постоянства дозы заряда в выходном буфере; и отвечает, например, броскам уровня потенциала в триггере перед передним или задним фронтом.

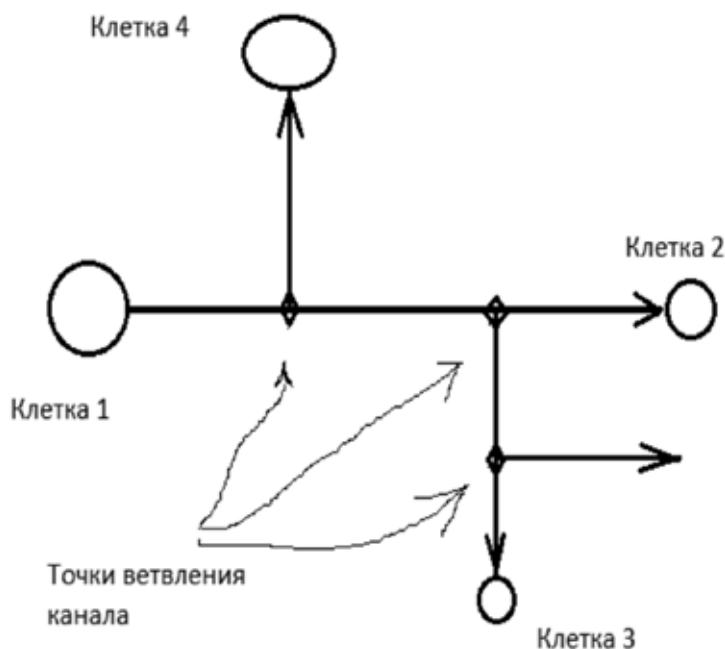


Рис.12. Канал и его ветви (гроздь связей).

6.2. Наблюдатель и шкала. Трасса.

В описание модели включаются *Наблюдатель*, *Шкала наблюдения* и *Трасса*. Такое расширенное толкование модели будем называть агентом. Сеть в узком понимании имеет три основные части – входы, выходы и обрабатывающую часть. Существенное отличие от привычных моделей – входы и выходы – это «плавающие» во времени фрагменты сети, пересекающиеся с обрабатывающей частью. Можно говорить о наборе элементов входных или выходных участков лишь в тот или иной момент времени. В обыденном понимании входные участки формируются динамически как объекты внимания. Входные и выходные элементы сети, не пересекающиеся с обрабатывающей частью, связывают схему с внешней средой.

Шкала, задаваемая Наблюдателем – важнейшая часть модели. Если состояния каналов в конкретный момент времени измеряются целыми числами – квантами, то есть порциями, импульсами перемещаемых по ним зарядов, то состояния нейронов – пороговые величины, имеющие шкалы равенства. Например, уровень заряда в теле нейрона может измеряться

громадными величинами числа ионов. Для Наблюдателя, как и для выходов уровень заряда может иметь лишь несколько дискретных значений, вплоть до бита. Это можно проиллюстрировать слуховым аппаратом – воспринимаемая нами мелодия зависит не только от профиля поступающей извне звуковой волны, но и от уровней чувствительности и различения частот нашим ухом. Об этом есть подробная книжка [19]. Там математически точно объясняется, что, если бы наше ухо имело повышенную частотную чувствительность, мы бы не слышали гениальных музыкальных сочинений – вместо симфонии мы слышали бы шум. Это связано, конечно, с операциями отождествления объектов и величин. Два состояния элемента или их набора могут считаться равными с точностью до уровня градуирования шкалы. Наблюдатель воспринимает результат работы сети как участок трассы состояний её элементов и каналов. Этот участок при измельчении шкалы различий может удлиняться до бесконечности. При укрупнении шкалы в трассе будут различаться всё более короткие, возможно иерархически вложенные циклы. Если принять, что моторная часть как выходы схемы также имеет пороговый характер, то и реакции будут различимы или идентичны для похожих ситуаций, относящихся к одному распознаваемому классу.

Шкала прежде всего требуется нам для описания Наблюдателя и Трассы. В зависимости от детализации шкалы мы обнаружим или не обнаружим периодические участки Трассы. Очевидно, при измельчении Шкалы периодичность участков Трассы может исчезать.

Наблюдатель на Рис.13 собственно и задаёт шкалы наблюдения, а тем самым сходства и различия состояний элементов. Имеющиеся сегодня основные инструменты изучения живой нейронной сети – ПЭТ и МРТ. ПЭТ, то есть позитронно-эмиссионная томография фактически использует красящие метки, продвижение которых высвечивает нам пути распространения нервных импульсов. МРТ или магнитно-резонансная томография позволяет наблюдателю увидеть приток крови в те или иные участки нейронной сети. В любом случае Наблюдатель явно или неявно использует конкретную шкалу приборов. Такие явления, как очаг возбудимости, что может относиться и к телам нейронов и к аксонам, определяются прежде всего чувствительностью измерительных приборов. Это же относится и к наличию связности областей возбудимости. Поэтому при разговоре о Доминанте мы не будем требовать связности составляющих её фрагментов и допустим режим «мигания», который в свою очередь может означать наличие «слаботочки» в каналах, связывающих фрагменты в единое целое.

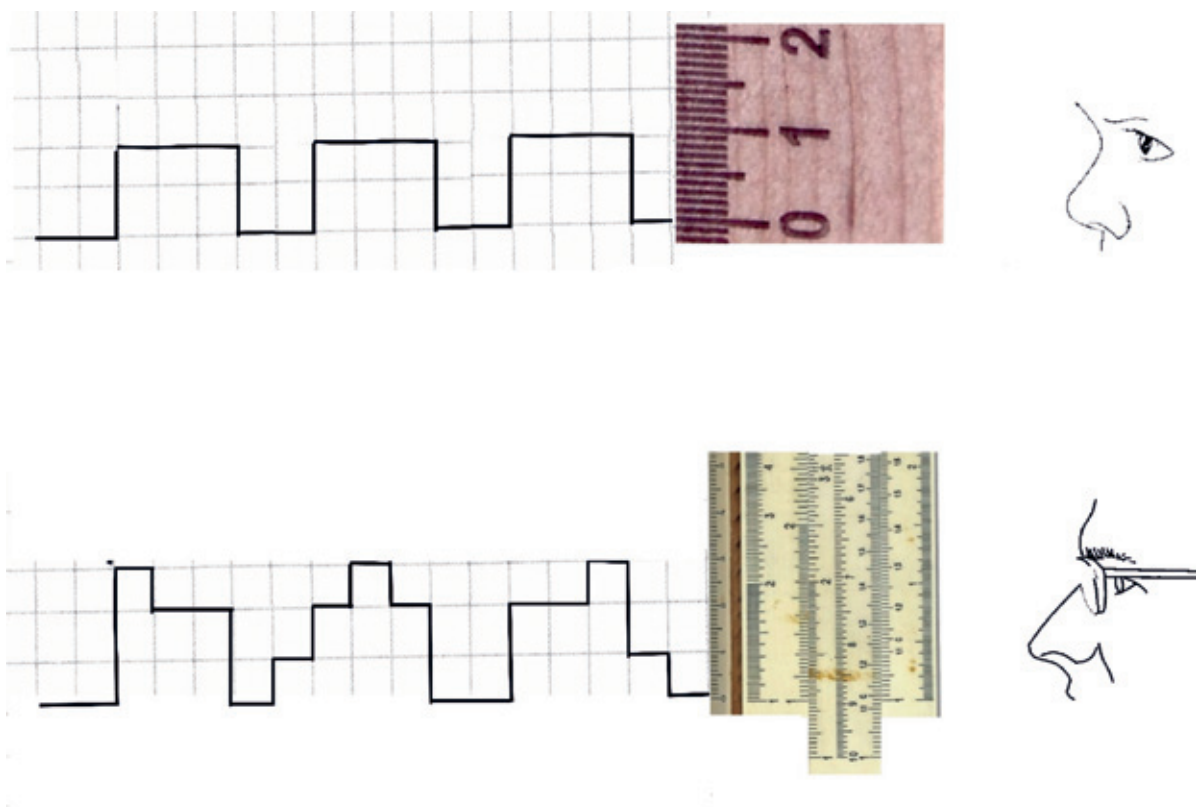


Рис 13. Воспринимаемый наблюдателем результат зависит от шкалы.

6.3. Законы сохранения. Разрушающее считывание

Сохранение заряда – важнейшая черта предлагаемой модели. Заряд, выброшенный из тела нейрона, оказывается в канале и движется по нему. Это – ионы. Волновой процесс заключается в непрерывном обмене ионами натрия и калия между внутренностью канала и внешней для него средой, в случае оболочного канала – в точках перехватов Ранвье. Может показаться, что исключения есть. На входе в нейрон могут храниться запасы отрицательных ионов, например, хлора. В этом случае заряд, поступивший в тело нейрона, может исчезнуть, но и в этом случае суммарная величина – баланс имеющихся в участке сети положительных и отрицательных зарядов сохранится. Нам достаточно в нашей модели перейти от натуральных значений заряда к целым числам со знаком.

Принцип сохранения заряда с алгоритмической точки зрения означает разрушающее считывание. Заряд, «считанный» из тела элемента, исчезает из источника. Напомним, что так на самом работает триггер компьютера – в нём после разрушающего считывания происходит его восстановление до исходного состояния. Это – один из важнейших источников выделения тепла в электронных схемах, чего не наблюдается в живой структуре.

6.4. Ускорение и замедление

В нейрофизиологии говорят о торможении импульса как потенциала действия. Мы предлагаем три термина, более привычных при описании физических процессов – ускорение, замедление, торможение. Торможение отличается от замедления тем, что при этом не просто падает до нуля скорость распространения сигнала, а возникает обратная волна – аналог автомобильной пробки. В нашей модели ускорение может происходить при увеличении сечения канала, а также при его разветвлении, замедление – при переходе в участок с меньшим сечением, а также при увеличении длины канала.

Содержимое памяти в нашей модели – относительные сдвиги сигналов во времени. Значит, они должны как-то меняться. Увеличение скорости прохождения импульса по каналу возможно прежде всего увеличением его поперечного сечения – это параметр канала. Замедление – увеличением его длины. Оба значения могут расти прежде всего в период «сна», который является обязательной и значительной по времени фазой работы сети. Рост канала в длину у живого мозга может достигать 1 мм в сутки – это довольно большая величина. Физические пространственные ограничения неизбежно потребуют при увеличении длины появления извилин – это позволяет в значительном диапазоне увеличивать эффективную длину канала связи между неподвижными нейронами. Замедление сигнала – основная операция модификации сети. Само по себе появление нейрона на пути растущего канала означает задержку сигнала во времени. Рост нейрона, то есть и его электрической ёмкости, как и рост входного буфера физически влечёт замедление продвижения заряда между нейронами. Физиологи чаще говорят о торможении, что может означать и его полное исчезновение. Один из природных механизмов такого гашения – нейромедиаторы из отрицательных ионов, суммирование с которыми уменьшает или уничтожает исходный импульс.

6.5. Бифуркация интервального времени.

Пусть по двум параллельным каналам, входящим в один и тот же принимающий элемент, или просто сливающихся без образования нового элемента движутся два импульса – как в примере о поросятах. Фронты обоих импульсов размыты – то есть между низкими и высокими уровнями заряда есть интервалы времени, когда в каналах идут переходные процессы.

Какова будет сумма обоих импульсов при их слиянии? До наступления переднего фронта первого сигнала она будет равна нулю, после прохож-

дения заднего фронта второго сигнала – она равна двум. Если переходные интервалы пересекаются во времени, то результатом будет число от нуля до двух. Можно говорить лишь о вероятности каждого из значений, которая, возможно зависит от размера и расположения таких пересекающихся интервалов. Значит, если один из сигналов будет тормозиться или ускоряться в циклическом контуре относительно другого, то будет увеличиваться и разброс их суммы. Это, в свою очередь, может приводить к преодолению или непреодолению пороговых значений результата, то есть ветвлению трассы состояний фрагмента сети.

7. ПРОСТЕЙШИЕ ПРИМЕРЫ.

Приведём несколько примеров для иллюстрации схемы работы гипотетической нейронной сети с использованием привычного пошагового времени. Мы будем рассматривать движущиеся заряды как небольшие целочисленные величины – исключительно в иллюстративных целях. Законы больших чисел обеспечат аналог приведённых схем при условии, что реально движущиеся заряды состоят из достаточно большого числа атомарных зарядов. Мы будем отслеживать уровни заряда в телах элементов и активность каналов в привычном понимании времени – иначе нам потребовалась бы компьютерная анимация, что нельзя наглядно выполнить в тексте.

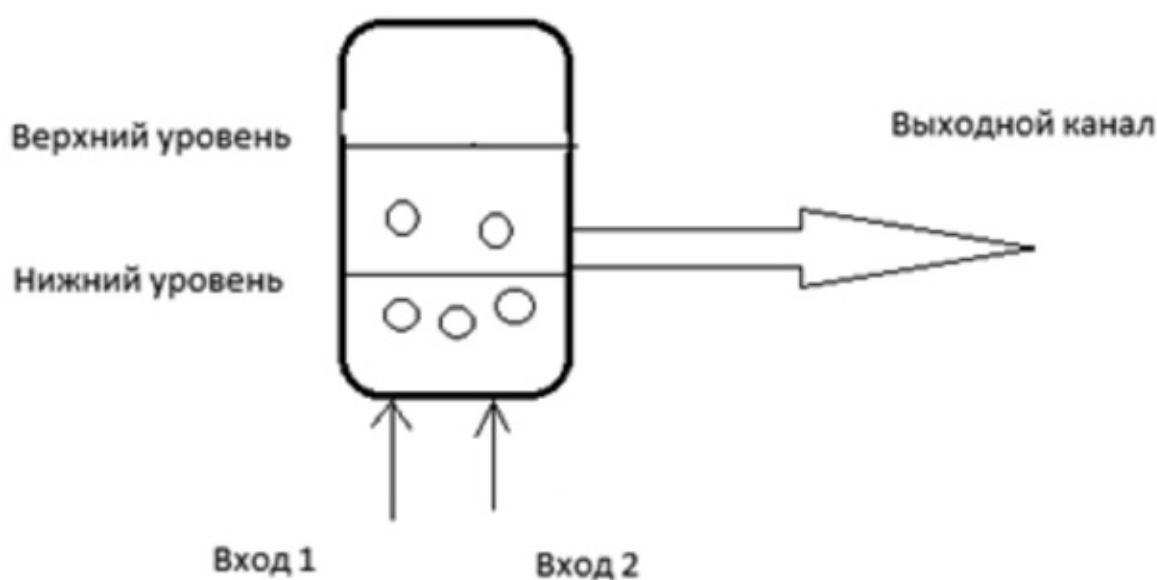


Рис. 14. Элемент с пороговыми уровнями, двумя входами и выходом.

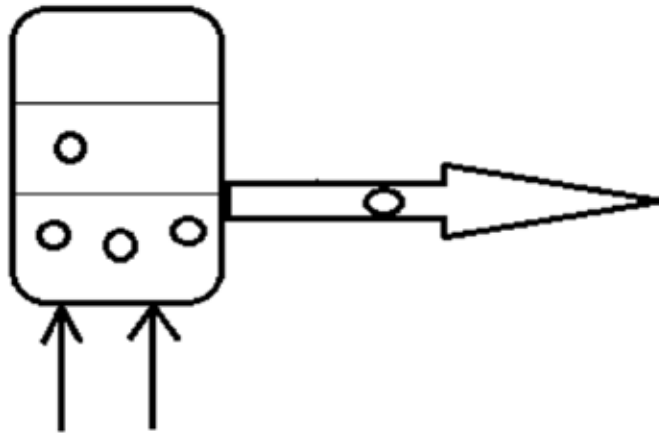


Рис. 15. Элемент в активном состоянии. Один заряд движется в канале.

Пусть элемент на Рис. 16 – аналог конденсатора – имеет постоянную ёмкость 10 единиц и два порога. Нижний порог – 3 единицы заряда и верхний – 7 единиц. Элемент имеет пару входов и один выходной канал. Элемент имеет в каждый момент времени определённый уровень заряда – от 0 до 10. Элемент имеет два состояния – активное и неактивное. В активном состоянии происходит сброс заряда по выходному каналу до достижения минимального порога. Элемент переходит в активное состояние при достижении верхнего порога.

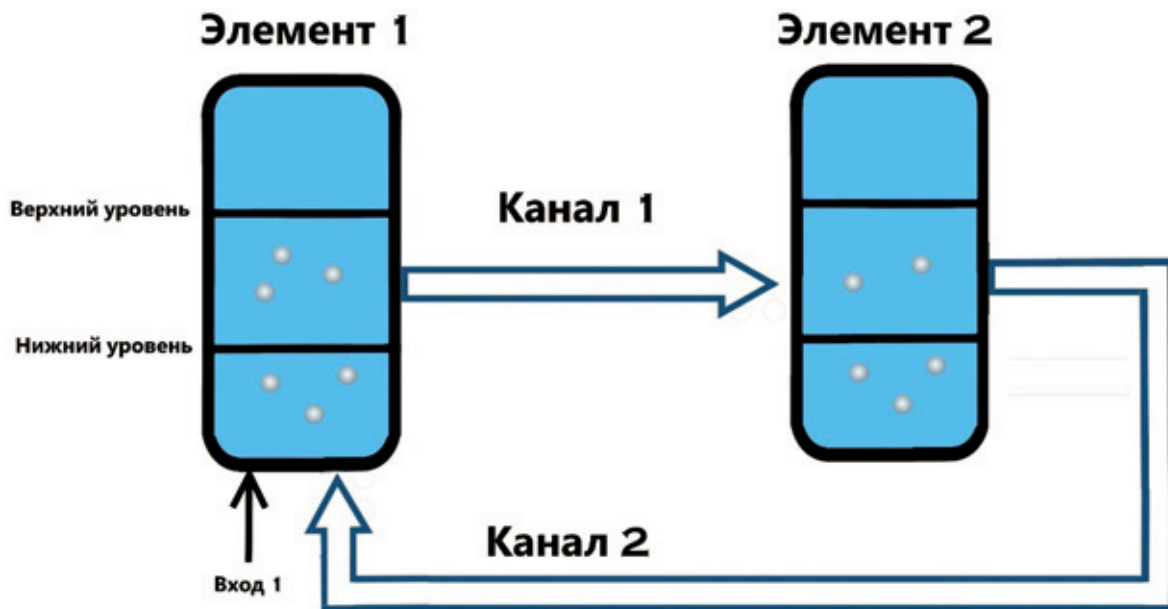


Рис. 16. Пара элементов с обратной связью. Элементы неактивны.

Уровни зарядов в их телах – 6 и 5 соответственно.

Дополнительный вход элемента 1 показан узкой стрелкой.

Воды элемента 2 не показаны.

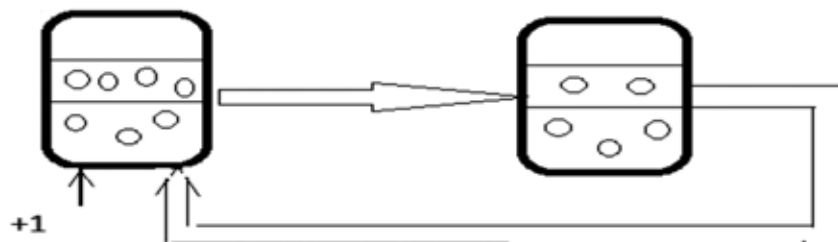


Рис. 17. В тело первого элемента по дополнительному входу поступает единичный заряд. В силу превышения порогового уровня заряда элемент 1 активируется.

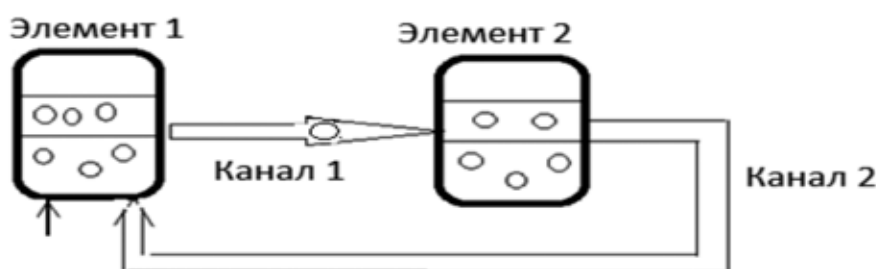


Рис. 18. Начинается сброс излишнего заряда из элемента 1 по каналу. Единица заряда перемещается в канале. Элемент 2 неактивен.

Несколько дальнейших шагов изобразим таблицей. Допущение о единичном времени прохождения единицы заряда по каналу позволяет нам условно считать единицы времени по событиям – смене уровня заряда в теле элемента или канале.

Уровень в Элементе 1	Заряд в канале 1	Уровень в Элементе 2	Заряд в Элементе 2	Комментарий
7	0	5	0	Активируется элемент 1
6	1	5	0	Единичный заряд движется по каналу 1
5	1	6	0	1 заряд из канала 1 достигает элемента 2. Ещё один заряд уходит из элемента 1 в канал 1. Элемент 1 сохраняет активное состояние, элемент 2 неактивен
4	1	7	0	Ещё один заряд по каналу 1 достигает элемента 2. Ещё один сбрасывается из элемента 1 в канал 1. Элемент 1 активен, активируется элемент 2

3	1	7	1	Единичный заряд уходит из элемента 2 в канал 2. Ещё один заряд уходит из элемента 1 в канал 1. Элемент 1 становится неактивным. Элемент 2 активен.
4	0	7	1	Единичный заряд из канала 2 достигает элемента 1 (обратная связь).
5	0	6	1	Единичный заряд по каналу 2 достигает элемента 1. Ещё один заряд уходит из элемента 2 в канал 2. Элемент 1 неактивен. Элемент 2 активен.
6	0	5	1	См. пред. шаг
7	0	4	1	Элемент 1 активизируется
7	1	3	1	Заряд из канала 2 достигает элемента 1. Заряд из элемента 1 уходит в канал 1. Заряд из элемента 2 уходит в канал 2. Элемент 1 активен. Элемент 2 становится неактивным.
7	1	4	0	Заряд из канала 2 достигает элемента 1. Заряд из канала 1 достигает элемента 2. Элемент 1 активен. Элемент 2 неактивен
6	1	5	0	Заряд из канала 1 достигает элемента 2. Заряд из элемента 1 уходит
5	1	6	0	Далее цикл с Шага 3

Таким образом мы наблюдаем после поступления единичного заряда на вход Элемента 1 три первых шага и потом цикл состояний длины 12.

Если в исходном состоянии уровень заряда в Элементе 1 был меньше, то добавление заряда на его вход перевело бы нашу пару в преднасыщенное состояние. Дальнейшее добавление заряда привело бы к циклу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время, асинхронно протекающее в системе из нескольких объектов, может рассматриваться как информационная среда громадной ёмкости. Синхронизация есть аннигиляция или уничтожение информации.

В асинхронной модели памяти предлагается использовать более сложные структуры, чем в синхронных сетях и непрерывность протекающих параллельных процессов. Модель предлагается строить из сегментированных каналов, нейронных тел, буферов, рассматриваемых как элементы временной задержки сигналов.

Предлагаемый подход не является попыткой моделирования современных представлений о сложных физико-химических процессах в живых нейронных сетях, ограничиваясь их информационной природой. Допуская принципиальную возможность альтернативных, не известных нам сегодня вариантов физико-химических процессов, составляющих основу живой памяти, мы категорически ограничимся естественнонаучной парадигмой.

Критерием эффективности для модели памяти предлагается считать её правдоподобие в смысле наличия наблюдаемых аналогов памяти живых систем из приведённого списка.

Мы начали с вопроса о том, может ли и как долго оркестр играть без дирижёра. Ответ в общем очевиден. Но как же сеть, работа которой начинается до рождения организма и непонятно когда завершается? Мы видели, как синхронизация процессов может погасить динамическую «режиссёрскую» среду, которая формируется и живёт в силу сложных геометрических структур каналов и простейших физических законов сохранения заряда. Это фактически ингибитор и убийца цепных реакций, которые идут в сети и составляют её информационное содержимое.

Об этом мы поговорим во второй части статьи, которая называется «Становление в хаосе». Базовые подсказки мы возьмём из теории Доминанты князя-академика Алексея Ухтомского. Нам потребуются немного математики, а главное – закон больших чисел Пафнутия Чебышёва.

Тема времени (точнее пространства-времени) в отечественной нейрофизиологии обнаруживается в малодоступной работе академика Алексея Алексеевича Ухтомского ([21]), вышедшей сразу после его кончины в блокадном Ленинграде в 1942. Сегодня она доступна в его личном архиве и в оцифрованном виде в Российской государственной библиотеке. Работа осталась неоконченной – в тексте всего 4 страницы и там даже не упоминается слово Доминанта. Но несколько важных положений мы приведём для связи с тематикой Части 2.

«Великое учение И. П. Павлова об «условных рефлексах» излагается нередко так, что условные, кортикальные по преимуществу, рефлексы качественно противопоставляются всем прочим рефлексам центральной области, и потому их надлежит изучать вполне самостоятельно и отдельно от общего учения о нервных центрах...

... Это представление о радикальной особенности кортикальных рефлексов иногда может казаться привлекательным, обеспечивая своего рода splendid isolation для соответствующих специалистов...

... Отличие, существенное и определяющее собой качественные особенности рефлексов низших центральных уровней и рефлексов кортикальных, заключается в количественной разнице интервалов между моментом рецепции возникающего стимула и моментом окончательного разрешающего ответа на этот стимул. В то время, как в низших центральных уровнях интервал между стимулом и разрешающим ответом так мал, что издавна напрашивается сближение физиологического стимула с «импульсом» классической механики, для кортикального и условного рефлекса характерно наличие более или менее значительного интервала между начальной рецепцией стимула и разрешающим рефлекторным актом. Это отвечает тому обстоятельству, что аппарат коры надстраивается над приборами рецепции на расстоянии в пространстве и времени...»

Алексей Ухтомский считал, что возможности естественных наук в изучении нервной системы не исчерпаны. И это в те времена, когда не было цифровых методов, а булевские функции выглядели игрой ума.

В заключение Части I напомним формулу для числа возможных вариантов упорядочения N элементов во времени.

$$I = \frac{(2N)!}{2^N}$$

Литература

1. *Сеченов И.М.* Рефлексы головного мозга // М., АСТ, 2014. 352 с
2. *Ухтомский А.А.* Доминанта. // М., Л.: «Наука», 1966. с 5 – 120
3. *Nadin M (ed.)*. Anticipation: Learning from the Past, Cognitive Systems Monographs 25 // Springer 2015
4. *Махиборода А.В., Подобин А.А., Ильичёв А.В.* Проблемы моделирования феномена самосборки. Ч. II. //»Наноструктуры» 17(2), 2017. с 5 – 48
5. *Франк-Каменецкий М.* Самая главная молекула: от структуры ДНК к биомедицине XXI века. //М., Альпина нон-фикшн, 2017. (Серия «Библиотека постнауки»). 336 с
6. *Николай Кузанский* сочинения, пер. В.В.Бибихина. // Изд-во «Мысль», Москва-1979. 471 с
7. *Шрёдингер Э.* Что такое жизнь с точки зрения физики. // РИМИС, 2009. 288 с
8. *Уоддингтон К.Х.* Основные биологические концепции // Сборник На пути к теоретической биологии, М., Мир, 1970. с 11-38
9. *Лен Жан-Мари.* Супрамолекулярная химия. //»Наука», Новосибирск, 1998. 334 с
10. *Кунин Е. В.* Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции // М., Центрполиграф, 2017. 527 с
11. *Ястребов С.* От атомов к дереву. Введение в современную науку о жизни // Альпина нон-фикшн, 2018. 704 с
12. *Бахтин М.М.* Формы времени и хронотопа в романе // Очерки по исторической поэтике М., Художественная литература, 1975. с. 234 -407
13. *Ливио Марио.* От Дарвина до Эйнштейна. //М., АСТ, 2015 («Золотой фонд науки»). 425 с
14. *Головаха Е.И., Кроник А.А.* Психологическое время личности. //Киев, «Наукова думка», 1984.
15. *Грэхем Лорен, Кантор Жан-Мишель.* Имена бесконечности. //СПб.: Издательство Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2011. 230 с.
16. *Филиппов Александр.* Многоликий солитон. // М., Наука, гл. ред. физ.-мат. лит. 1990, 286 с
17. *Нейман Джон фон.* Вычислительная машина и мозг. // М., АСТ, 2018. 192 с
18. *Игумен Феофан (Крюков).* Модель внимания и памяти, основанная на принципе Доминанты и компараторной функции гиппокампа. // ЖВНД. – 54 (1), 2004. с. 10–29,
19. *Любищев А.А.* Проблемы формы систематики и эволюции организмов. //М., Наука, 1982. 281 с
20. *Шилов Г.Е.* Простая гамма. Устройство музыкальной шкалы. //Серия «Популярные лекции по математике». ГИФМЛ, М., 1963. 20 с
21. *Ухтомский А. А.* Система рефлексов в восходящем ряду. //Груды научной сессии, посвящённой памяти академика И.П.Павлова 27-28 сентября 1942 г. Ленинградское газетно-журнальное издательство, Ленинград 1942 Под ред. Профессора В.И.Делова. с. 7-10

**ASYNCHRONOUS APPROACH TO MODELING
OF NEURAL NETWORK.
PART I. TIME AS A NONMATERIAL MEMORY MEDIUM.**

A.V. Denisenko

bp.denisenko@mail.ru

Received 20.11.2018

An artificial neural network is considered as a memory. No central synchronization is required for the operation of such a network which consists of continuous independent processes in its elements. The relative time shifts of these processes turn out to be the information storage of a very large capacity. Several properties and effects of natural neural systems are listed. The works of I. Sechenov and A. Ukhtomskii are used as prompts for the designers. The capacity of such a memory is estimated.

Key words – asynchronous neural network, Ukhtomskii dominant, threshold summation, reconfiguration, interval numbers

DOI: 10.31145/2224-8412-2018-19-1-05-50