

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Доктор физико-математических наук А. ЖДАНОВ, заведующий Отделом имитационных систем Института системного программирования РАН.

Моделирование работы мозга — одна из самых интересных научных проблем нашего столетия. В сороковых годах, когда вышли в свет книга Норберта Винера «Кибернетика, или Управление и связь в животном и в машине» и другие научные работы на эту тему, когда появились и начали распространяться ЭВМ, проблема перешла из области научной фантастики в область реальных теоретических исследований и практического моделирования. Обращался к этой теме и журнал «Наука и жизнь» (см. статьи академика В. Глушкова в № 8, 1962 г.; № 6, 1965 г.; № 11, 1966 г.; № 2, 1971 г.; № 1, 1972 г.; № 9, 1978 г. и академика Н. Амосова в № 7, 1967 г.; № 5, 1989 г.). А читатель Н. Колбасин вспомнил, что в 1963 году, в период увлечения кибернетикой, Владимир Тендряков написал научно-фантастическую повесть «Путешествие длиной в век». В ней писатель решал проблемы жизни и смерти, записи и переноса в другое тело человеческой психики, интеллекта и другие аналогичные вопросы, сегодня всерьез обсуждаемые учеными (см. «Наука и жизнь» №№ 9—12, 1963 г.).

Однако увлекательность проблемы оказала ей дурную услугу. Неоднократно эта тема страдала от некомпетентных или недобросовестных интерпретаторов, претерпевая необоснованные, но весьма захватывающие дух взлеты, обескураживающие и тяжелые своими последствиями спады, периоды забвения. Кажется, лишь в последние десять лет волнение улеглось и исследования в этой области протекают в сравнительно деловой и спокойной обстановке.

Пережив все коллизии, тематика раздробилась на множество отдельных направлений. Сегодня само слово «кибернетика» произносят редко. Речь обычно идет о теории управления, нейрофизиологии, искусственном интеллекте, распознавании образов,

## НЕРВНАЯ СИСТЕМА КАК АВТОНОМНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Договоримся о терминах. Обычно при моделировании нервных систем в точных науках пользуются следующими синонимами биологических объектов.

Кибернетические объекты	Биологические объекты
Среда	Объект управления (ОУ)
Управляющая система (УС)	Датчики
Исполнители	Окружающая среда
Организм	Нервная система и мозг
Рецепторы	Эффекторы

Прежде чем приступить к конструированию модели нервной системы, необходимо наложить ряд ограничений на нашу будущую модель.

Конструктор, разрабатывающий какую-либо систему, всегда ограничен «исходными условиями». Его задача — построить систему так, чтобы она была для них оптимальна. Поэтому при одинаковых исходных условиях два конструктора часто независимо друг от друга приходят к одному и тому же результату. Посмотрите, например, как сегодня похожи друг на друга хорошие автомобили разных марок — даже их форма вынужденно диктуется аэродинамикой.

Природа, создавшая нервные системы, во многом подобна конструктору. Если мы правильно угадаем «исходные условия» и цели, стоящие перед нею, а потом учтем их в своих разработках, то вынуждены будем получить аналогичный результат.

Примем в качестве «исходных условий» для нашей модели ряд свойств нервной системы, оговорившись сразу, что они носят приближенный характер.

### 1. Автономность.

Задача нервной системы — управлять организмом. Условие автономности означает то, что нервная система должна самостоятельно, без подсказок извне, находить способ управления. При этом нервная система заключена внутри организма и может взаимодействовать с окружающей средой лишь посредством рецепторов и эффекторов (исполняющих органов).

Заметим, что, даже если у нервной системы есть какие-то внешние «учителя», она все равно воспринимает их своими рецепторами. Что же касается неких «таинственных воздействий», способных проникать в нервную систему, минуя «штатные» входные каналы (рецепторы), здесь мы их учитывать не будем.

### 2. Дискретность.

Нервная система — устройство во многом дискретное. На ее «входе» находятся рецепторы, которых может быть очень много, иногда несколько миллионов, но важно то, что число их конечно. Состоит нервная система из отдельных (дискретных) объектов — нейронов и нервных волокон, которые обмениваются нервными импульсами — дискретными сигналами. На «выходе» нервной системы можно видеть большое, но тоже конечное число нервных окончаний, через которые исходят импульсы, управляющие работой исполнителей — мышц и желез.

представлении информации и принятии решений, нейронных сетях, робототехнике, искусственной жизни и многом другом. Специалисты разных направлений иногда с трудом понимают друг друга, неохотно объединяются и часто по-разному понимают даже цели своих исследований.

Выделяют два основных подхода к исследованию и моделированию высшей нервной деятельности — имитационный и прагматический. Имитационный подход имеет целью сымитировать как результат работы мозга, так и сам принцип его действия. Специалисты этого направления говорят: «Нам интересно понять, как именно работает мозг». Прагматический подход, напротив, ставит целью получить практически полезные результаты любым подходящим способом, совершенно не соотносясь с принципами работы мозга. Специалисты этого направления говорят: «Нам важно любыми методами научить машину решать сложные интеллектуальные задачи, какие умеет решать только человек, — и желательнее быстрее, точнее и лучше. А как работает мозг, мы не знаем и, наверное, не узнаем никогда».

К примеру, ставится задача — создать устройство для управления велосипедом. Специалист-прагматик составит систему дифференциальных уравнений, описывающих движение велосипеда, решит ее и, записав решение в память управляющей системы, тем самым научит ее управлять велосипедом. Специалист имитационного подхода скажет: «Позвольте, но в голове трехлетнего ребенка нет никаких дифференциальных уравнений, однако он, набив несколько синяков, успешно и достаточно быстро обучается езде на велосипеде! Нет, природа решает задачу по-другому. Давайте искать, как она это делает».

В действительности оба подхода дополняют друг друга. Как правило, основные идеи и направления появляются в стане имитаторов, после чего скрупулезные прагматики доводят их до стадии практически полезных разработок.

Не ставя целью дать обзор всех достижений в области моделирования высшей нервной деятельности, остановимся на том понимании вопроса и тех результатах, которые получены научной группой, составляющей Отдел имитационных систем (<http://www.ispras.ru/~zhdanov>) Института системного программирования РАН (<http://www.ispras.ru/>).

Разрабатываемую нами имитационную модель нервной системы мы называем системой автономного адаптивного управления (ААУ).

Надо учитывать, конечно, что ряд параметров нейронов описывается непрерывными величинами. Это, например, размеры синапсов, «стыковочных узлов» нейрона и одновременно основных запоминающих устройств нервной системы. Кроме того, не вся информация передается в виде импульсов по нервным волокнам. На нейрон могут оказывать влияние также многочисленные метаболические процессы в организме.

### 3. Начальная приспособленность.

Нервная система как часть организма изначально приспособлена к условиям существования, в которых жили многие предшествующие поколения. В ходе длительного естественного отбора природа нашла оптимальные для данного организма рецепторы, исполнители, отделы нервной системы, связи между нейронами, выработала для нервной системы оптимальный «алгоритм» ее функционирования. Змея, например, видит в инфракрасном диапазоне, а человек нет. Глаз лягушки хорошо видит лишь движущиеся точки, а человеческий глаз лучше распознает прямые линии. Собака, по-видимому, неспособна воспринять модель атома по Бору, а у человека нельзя сформировать образы из тысяч запахов, которыми оперирует собака.

Здесь важно заметить следующее. Ни в природе, ни в лаборатории нельзя создать распознающую систему, которая могла бы воспринять абсолютно все закономерности-образы входной информации. Она будет выделять образы только того вида, на который заранее настроена. Поэтому в нервной

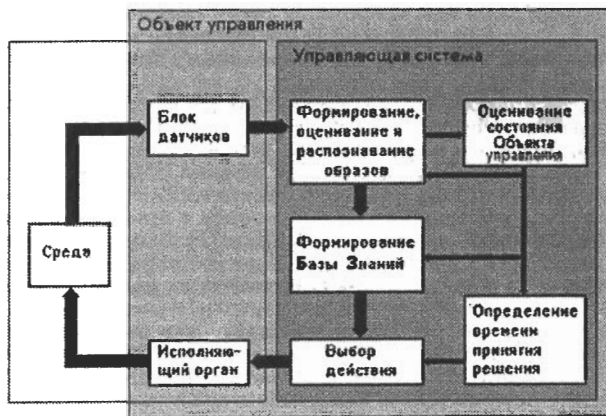
системе должны храниться «заготовки» всевозможных их видов. За них-то и отвечает огромное число нейронов, большая часть которых остаются незадействованными в течение жизни человека. Однако никто не сможет сказать заранее, какие именно нейроны могут понадобиться. Избыток нейронов обеспечивает организму возможность адаптации.

### 4. Минимум исходных знаний.

После рождения организма, обладающего некоторой начальной приспособленностью и избытком нейронов, его нервная система начинает накапливать знания и информацию. Этот процесс продолжается в течение всей жизни организма (хотя одновременно идет и потеря знаний, например вследствие отмирания части нейронов). Накопление информации происходит в нейронах, при этом изменяется смысл сигнала, представленного нервным импульсом. Например, до и после обучения нервная система может совершенно по-разному реагировать на одинаковые с виду нервные импульсы. Здесь мы имеем дело с информационным процессом приспособления (адаптации), который и будем называть адаптивным управлением. Именно ему живые существа обязаны своей способностью распознавать образы, вырабатывать рефлексы, обучаться, принимать решения.



**ЧЕЛОВЕК И КОМПЬЮТЕР**



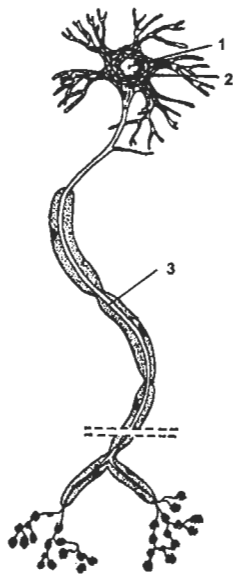
Устройство управляющей системы как модели нервной системы. Такое устройство вынужденно вытекает из принятых нами в качестве исходных условий четырех свойств нервной системы.

### КАК РАБОТАЕТ НЕРВНАЯ СИСТЕМА

Итак, начнем конструировать нашу управляющую систему (УС) как модель нервной системы, исходя из принятых выше четырех условий. Пусть она будет неким «черным ящиком», на который поступает дискретная «входная информация» от датчиков, а от него исходит «выходная информация» в виде команд исполнительным устройствам.

Попробуем представить себе процессы, происходящие внутри «черного ящика». Для этого посадим туда гипотетического наблюдателя — что-то вроде Демона Максвелла,

*В биологических нейронах входные сигналы — нервные импульсы — поступают к нейрону (1) через контакты-синапсы, расположенные на отростках-дендритах (2), число которых может достигать тысячи. Выходом нейрона служит длинный (до 1,5 метра) разветвляющийся отросток — аксон (3). На синапсах и в теле нейрона происходит логическая обработка поступающих импульсов. При этом нейрон как бы решает, следует ли ему выдавать выходной сигнал на аксон или нет. Сначала нейрон «обучается», пытается отыскать неслучайные комбинации в потоке входных сигналов. Находя их, нейрон постепенно становится «обученным» и начинает узнавать эти комбинации, сообщая об этом выходным сигналом на своем аксоне.*



сортировавшего молекулы в термодинамике. В соответствии с духом времени снабдим нашего Демона «современным телефоном», чтобы он мог передавать нам свои наблюдения.

Итак, выходим на связь с Демоном.

**Сообщение 1.** «Я хочу выжить и, более того, хочу постоянно улучшать ощущение своего состояния».

Разумно: выживание и улучшение ощущения состояния есть цель управления нервной системы. При этом мы полагаем, что наш Демон «умный» и понимает, что в

роли нервной системы он может выжить только вместе с телом и окружающей его средой, взаимодействуя с ней. Демон должен улучшать свое состояние таким образом, чтобы это не противоречило его выживанию. Например, для получения приятного «ощущения сытости», нервной системе нужно дать сигнал накормить подведомственное ей тело, а не раздражать какие-то свои нервные центры электром или наркотиком. Кроме того, в результате естественного отбора «приятные» ощущения в некоторых состояниях должны соответствовать объективной пользе этих состояний для объекта управления.

**Сообщение 2.** «Я должен активно действовать, чтобы находить новые возможности улучшать свое состояние. Для активных действий у меня есть кнопки, на которые я могу нажимать, и показания датчиков, на которые я могу смотреть».

Заметим, что активность — необходимая стратегия искомого принципа управления. Альтернативную стратегию — пассивное управление, когда система только реагирует на входные воздействия, — мы отвергаем, ибо она не ведет к поиску новых возможностей для улучшения состояния.

Зададим вопрос Демону: «Как вы определяете свое состояние, его улучшение и ухудшение?»

**Сообщение 3.** «Не знаю, как я это делаю, но во мне есть некий «хорошеметр», аппарат эмоций, который позволяет мне чувствовать свое состояние в терминах «великолепно», «очень хорошо», «так себе», «плохо», «очень плохо», «невыносимо», а также его изменение в лучшую или худшую сторону. Видимо, оценка текущего состояния как-то зависит от входной информации и оценки уже сформировавшихся образов».

По-видимому, именно аппарат эмоций обеспечивает активность нервной системы. Если мы его отключим, Демон не захочет ничего делать, управление прекратится и объект управления погибнет.

**Сообщение 4.** «Чтобы улучшить свое состояние, я должен найти способ управления. Для этого надо отыскать связь между моими действиями (нажатием кнопок) и показаниями датчиков, а также моими эмоциями».

*Схема нейрона, используемого в традиционных нейросетях.*

Итак, Демон сформулировал еще одну целевую функцию: поиск и накопление знаний. Очевидно, что, чем больше знаний будет накоплено управляющей системой, тем более надежные способы выживания она сможет найти, тем успешнее сможет улучшать свое состояние. С другой стороны, чем дольше будет существовать объект, тем больше знаний он накопит. Поэтому обе целевые функции — выживание и накопление знаний — тесно связаны между собой (по нашему мнению, главная цель существования и есть накопление знаний).

**Сообщение 5.** «Для начала попробую найти закономерности во входной информации».

Разумно. Но может ли Демон обнаружить закономерности в беспорядочном мелькании входных сигналов? Может, если он в состоянии заметит в них неслучайные совпадения. Если в какой-то момент ему покажется, что некоторую комбинацию сигналов он видит уже не в первый раз — значит, он сформировал образ.

**Сообщение 6.** «Это красное пятно в нижнем углу правого монитора я уже видел! Постойте, но и этот одновременный скачок трех стрелок иногда повторяется».

Ну вот, уже два образа сформированы — номер 1 и номер 2. Это первые составляющие эмпирического знания нашей управляющей системы. Демон может занести их в свою Базу Знаний.

**Сообщение 7.** «Теперь, когда образ номер 1 или номер 2 появляются в показаниях датчиков, я сразу узнаю их».

Сформированные образы (иначе их еще называют таксонами, паттернами, классами объектов) управляющая система может распознать в те моменты, когда в поле зрения датчиков появляются их прообразы.

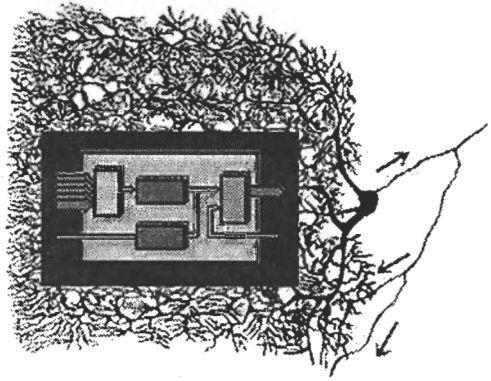
**Сообщение 8.** «Пытаюсь найти способы воздействия на образы номер 1 и номер 2. Для этого беспорядочно нажимаю на все имеющиеся кнопки».

А что еще остается делать, если нет никаких оснований для более разумной тактики. Интересно, что произойдет раньше: Демон найдет какую-либо закономерную связь между нажатием кнопки и реакцией образа либо выявится зависимость образов от эмоционального состояния Демона?

**Сообщение 9.** «Всякий раз, когда я распознаю образ номер 1, мне становится «плохо». А когда распознаю образ номер 2, мое состояние никак не изменяется. Запомним это».

Ну вот, в данном случае первыми сформировались эмоциональные оценки образов. База Знаний пополнилась новой информацией.

**Сообщение 10.** «Нашел! В 70% случаев, когда я нажимаю



на кнопку номер 47, появляется образ номер 2, но только при условии, что в предыдущий момент был распознан образ номер 1».

Вот управляющая система и получила первое знание: в каких условиях, каким действием и с какой вероятностью вызывается (или вытесняется) определенный образ. Назовем нажатие на кнопку номер 47 действием номер 1.

*Модель нейрона, разработанная для метода автономного адаптивного управления. На вход нейрона поступают «бинарные» сигналы (типа 0 — 1, «да» — «нет») в виде одинаковых импульсов от датчиков или других нейронов. Импульсы попадают на элементы задержки (1), моделирующие задержку сигналов в синапсах, дендритах и т. п. Элементы (2) вырабатывают сигналы, соответствующие по длительности нервным импульсам. Блок (3) — основной элемент памяти нейрона. По мере «обучения» его синапсы растут, причем первыми пороговой величины достигают синапсы, соответствующие неслучайным комбинациям входных сигналов. В дальнейшем эти комбинации будут распознаваться. Пройдя через схему совпадений (4), они вызовут появление выходного сигнала. Эти же импульсы, пройдя через блок задержки (5), восстанавливают исходное состояние нейрона.*

