

*М. Б. БЕРКИНЕЛИТ*

# НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Экспериментальное  
учебное  
пособие



Москва 1993

**Беркинблит М. Б.**

**Нейронные сети: Учебное пособие. — М.: МИРОС и  
ВЗМШ РАО, 1993. — 96 с.: ил.**

**ISBN 5—7084—0026—9**

Пособие содержит около ста задач по нейрофизиологии и нейронным основам поведения животных, а также теоретический материал, необходимый для их решения. Показывается, как могут быть устроены сети из нейронов, управляющие разными функциями организмов. Наряду с большим биологическим материалом, новым для школьников (маленькие нейронные сети беспозвоночных, например, сеть, обеспечивающая плавание пиявки; нейронные сети зрительной системы; принцип латерального торможения и т. д.), в книге содержатся общие представления о работе автоматов и математической логике. Опыт показывает, что учащиеся с большим интересом решают предложенные в пособии задачи. Часть включенных в него задач придумана школьниками.

Пособие может быть использовано учителями биологии в учебном процессе и при ведении кружковых занятий, а также школьниками, интересующимися биологией. Написанная простым языком книга представляет интерес и для более широкого круга читателей.

**Михаил Борисович Беркинблит**

## **НЕЙРОННЫЕ СЕТИ**

**Экспериментальное учебное пособие**

**Зав. редакционно-издательским**

**отделом Т. И. Балашова**

**Художник В. А. Галкин**

**Иллюстрация Т. А. Беловой**

**Художественный редактор В. И. Пономаренко**

**Технический редактор И. В. Прошина**

**Корректоры О. А. Розачева, Е. В. Вишникина**

**Оригинал-макет изготовлен**

**в Компьютерном центре МИРОСа**

**Н/К**

**Изд. № Ф30(03). Подписано в печать 14.05.93.**

**Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная».**

**Печать офсетная. Печ. л. 6. Тираж 10 000 экз.**

**Заказ № 1147**

**Цена договорная.**

**Московский институт**

**развития образовательных систем.**

**109004, Москва, Нижняя Радищевская ул., д. 10.**

**Отпечатано в Московской типографии № 6 Мининформпечати РФ.**

**109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.**

**Изд. № Ф30(03)**

**© Беркинблит М. Б.;**

**ISBN 5—7084—0026—9**

**© Московский институт**

**развития образовательных систем (МИРОС), 1993**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Нейронные сети занимают заметное место в современной науке. С одной стороны, их изучают нейрофизиологи. Появилось множество статей и книг о «малых нейронных сетях» беспозвоночных, о нейронных сетях мозжечка и т. д. С другой стороны, нейронные сети изучаются математиками и кибернетиками. Их изучение с этой точки зрения началось в теории автоматов, а в последнее время широко исследуются возможности использования нейронных сетей для вычислений и для создания вычислительных машин («сети Хопфилда», «нейрокомпьютеры»). Вся эта биологическая и математическая проблематика интенсивно развивается на протяжении последних 50-ти лет. Однако она, как правило, остается совершенно неизвестной и школьникам, и учителям, хотя многие вопросы, рассматриваемые в связи с нейронными сетями, вполне доступны любому школьнику. Дело тут не в сложности проблем, а в сложившихся традициях школьного образования.

Данное пособие представляет собой попытку нарушить такую традицию и ввести в школьный обиход понятия, проблемы и результаты соответствующего раздела «большой науки». Однако дело тут не только и не столько в том, чтобы ликвидировать разрыв между содержанием школьного знания и уровнем современной науки, чтобы немного «подтянуть» уровень знаний школьников к научным достижениям конца XX в. Тема «Нейронные сети» представляется важной и по другим соображениям.

Убежден, что в курсе биологии школьники должны решать задачи подобно тому, как это уже давно делается при изучении математики, физики и химии. Тема «Нейронные сети» дает для этого богатые возможности, сопоставимые разве что с

генетикой. Например, один из классов задач по нейронным сетям состоит в том, что предлагается набор элементов (нейронов) с заданными свойствами и задается некоторая функция или форма поведения. Школьник, решающий задачу, должен сконструировать из элементов с заданными свойствами такую систему, которая осуществляла бы заданную функцию. Иными словами, решающий задачу должен придумать, сконструировать некоторую целесообразно функционирующую машину («нейронную машину»). Это типичная конструкторская задача.

В пособии содержатся и другие типы задач по нейронным сетям. Всего в нем собрано свыше ста задач по этой тематике.

Однако значение решения задач на «нейронные сети» вовсе не ограничивается тем, что с их помощью можно привлечь школьников, интересующихся биологией, к изобретательской деятельности на естественном для них материале, тем самым развивая их конструкторские способности и вообще развивая их мышление. Тема «Нейронные сети» несет и другую важную нагрузку.

Дело в том, что школьники при изучении физиологии неоднократно слышат от учителя или читают в учебнике слова о том, что нервная система регулирует работу сердца, дыхания и т. д. Однако при этом у учащихся не возникает никакой конкретной картины, как могла бы реализоваться эта функция нервной системы. Иными словами, говоря о регулирующей и управляющей функциях нервной системы, школьник произносит некоторые заклинания, которые не задевают его собственной эмоциональной сферы и не опираются на понимание сути дела.

Напротив, ученик, который самостоятельно решил некоторое количество задач по нейронным сетям, достаточно четко представляет себе, как может работать мозг, как мозг может решать те или иные задачи. Вместо общих слов о мозге у школьника возникает представление о нем как о некоторой материальной системе, работающей по определенным правилам, причем принципы работы этой системы могут быть изучены и поняты.

При подготовке данного пособия автор опирался на опыт работы Биологического отделения Всесоюзной заочной многопредметной школы РАО при МГУ. Начиная с 1986 г. на встречах со школьниками, проводимых во время летних ка-

никул, автор регулярно читал лекции и вел семинары по нейронным сетям. Надо отметить, что задачи по нейронным сетям вызывают большой интерес не только у учащихся. На семинарах летник школ обычно присутствовали студенты, аспиранты и сотрудники МГУ. Как правило, большинство присутствующих довольно быстро втягивались в процесс решения задач, предложенных школьникам, и решали их с не меньшим азартом, чем учащиеся. Эти семинары, проводимые ежегодно, постепенно пополняли «банк задач» по нейронным сетям.

В 1988 г. В. В. Чуб написал небольшое задание для учеников VIII класса, включив в него еще некоторое число собственных задач на эту тему. Новые задачи были предложены в 1990 и 1991 гг. на семинарах по нейронным сетям, проведенных в рамках субботнего лектория МГУ для школьников Москвы. Автор признателен всем, кто помогал в проведении семинаров и подборе задач, и в первую очередь А. Б. Образцову и В. В. Чубу\*. Автор выражает также глубокую благодарность доктору биологических наук Ю. И. Аршавскому и А. В. Жердеву, которые внимательно прочли рукопись и сделали ряд полезных замечаний.

Пособие предназначено в первую очередь для учащихся Биологического отделения ВЗМШ и для самобразования. Оно может быть использовано учителями при проведении факультативных занятий по физиологии или в работе биологического кружка, а также при изучении биологии в спецклассах физико-математической ориентации (при этом руководителям таких занятий весьма целесообразно использовать дополнительную литературу, указанную в конце пособия).

Автор отдает себе отчет в том, что эта первая попытка ввести в школьный обиход совершенно новую тематику имеет ряд недостатков. Все критические замечания и предложения, решения задач и новые задачи просьба присылать по адресу: 109004 Москва, Нижняя Радищевская, 10, МИРОС или 119823 Москва, Ленинские горы, МГУ, ВЗМШ «Биология», М. В. Беркинблиту.

\*В пособие включены задачи, предложенные А. Б. Образцовым (№ 4.8, 5.14), В. В. Чубом (№ 4.10, 6.4, 6.5), А. В. Жердевым (№ 2.2, 2.8, 2.13, 3.26а, 4.20), Е. Г. Глаголевой (№ 3.2).

## § 1. НЕРВНЫЕ КЛЕТКИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Мы подошли к берегу пруда, и лягушки у нас из-под ног прыгают в воду. Зададим себе вопрос: как они это сделали? Отвечая на него, мы будем говорить так: лягушка заметила нас, испугалась и прыгнула в воду. Но ведь это почти простое описание факта. А что же при этом происходит внутри лягушки? Какие процессы возникают в ее нервной системе?

К сожалению, о нервной системе обычно говорят, что она «регулирует» те или иные процессы, «управляет» поведением и т. д. Трудно считать такие рассуждения научными, поскольку все они идут, так сказать, на филологическом уровне. Остается непонятным, как именно нервная система «управляет» и «регулирует». Для того чтобы это понять, о нервной системе надо говорить на другом языке, используя другие понятия. Данный параграф и посвящен введению такого языка.

Нервная система, как и другие системы организма, состоит из клеток. Эти клетки называют *нервными клетками* или *нейронами*. Реальные нервные клетки весьма разнообразны и по форме, и по свойствам; они отличаются и в разных отделах мозга одного животного и, еще сильнее, у разных групп животных, например кишечнополостных и позвоночных. Здесь рассматриваются некоторые свойства «усредненного» нейрона, причем только те, которые нужны для дальнейшего использования. Нейроны, как и другие клетки организма, имеют ядро, митохондрии и другие органеллы, но для наших целей нет необходимости рассматривать их работу.

Для нас представляет интерес только та оболочка, которая покрывает нервную клетку; ее называют *клеточной мембраной*. Эта мембрана состоит из жироподобного вещества (липидов). Наверное, каждый из вас видел масляную пленку на воде: масло растекается по воде слоем толщиной в одну мо-

лекулу. Клеточная мембрана в два раза «толще»: она состоит из липидного слоя толщиной в две молекулы. В эту липидную пленку встроено множество белковых молекул. Некоторые из этих белков нам придется дальше рассмотреть, так как они важны для работы нейрона.

При изучении нервных клеток начиная с 1946 г. используют микроэлектроды. Микроэлектроды — это тончайшие стеклянные трубочки, пустые внутри; диаметр их кончика составляет всего около 0,001 мм. Если микроэлектродом проткнуть мембрану нейрона, то липидная пленка смыкается вокруг микроэлектрода, заживляя отверстие, и нейрон продолжает нормально жить и работать. Внутреннюю часть микроэлектрода заполняют солевым раствором, который хорошо проводит электрический ток. Если ввести в нейрон микроэлектрод, поместить второй электрод (обычно для этого используют серебряную проволочку) в среду, окружающую нейрон, и присоединить к этим электродам вольтметр, то он регистрирует разность потенциалов (рис. 1).

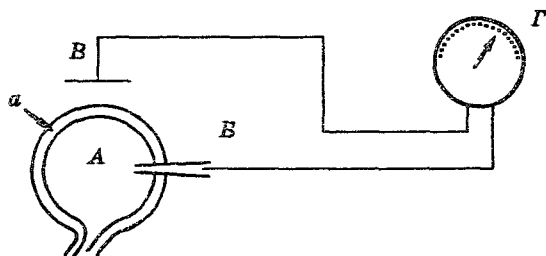


Рис. 1. Измерение мембранного потенциала нейрона:  
 А — нейрон, а — его мембрана; Б — микроэлектрод; В —  
 второй электрод, находящийся в среде, окружающей нейрон;  
 Г — измерительный прибор

Эту разность потенциалов между внутренним содержимым клетки (цитоплазмой) и наружной средой называют *мембранным потенциалом*. В покое величина мембранного потенциала равна почти 0,1 В. Цитоплазма клетки имеет знак минус, а наружная среда — плюс.

Откуда берется эта разность потенциалов? И в клетке, и вне ее находятся заряженные атомы и молекулы — *ионы*. Внутрь клетки много ионов калия (их обозначают  $K^+$ , так как они несут положительный заряд), а снаружи ионов калия

мало. Зато в наружной среде сравнительно много ионов натрия  $\text{Na}^+$  и хлора  $\text{Cl}^-$ . Вы знаете, что, когда зализываешь ранку, чувствуешь соленый вкус крови; он создается как раз хлористым натрием, растворенным в крови, который называют также поваренной солью.

Мы уже говорили, что в клеточной мембране имеются молекулы белков разного назначения. Среди них есть группа молекул, которые называют *ионными каналами*. Эти молекулы «прошивают» клеточную мембрану так, что часть белковой молекулы находится внутри клетки, а часть — снаружи. Внутри белковых молекул имеется отверстие — канал, который пропускает ионы того или иного сорта. Например, есть калиевые ионные каналы, они пропускают ионы калия, но не пропускают ионы натрия или хлора; есть натриевые каналы, кальциевые каналы и т. д. У ионных каналов есть специальный участок — ворота, которые могут закрываться или открываться под действием разных факторов. Если ворота закрыты, то ионный канал не пропускает через себя никакие ионы.

В покое у нейрона открыты калиевые каналы. Внутри клетки много ионов калия, и эти ионы начинают выходить через калиевые каналы, вынося с собой и свой положительный заряд. Это и приводит к появлению мембранного потенциала. Но через некоторое время ионы калия перестают выходить наружу: ведь они сами заряжены положительно, как и наружная среда, а одноименные электрические заряды отталкиваются.

Итак, в покое у нейрона существует мембранный потенциал, равный примерно 0,08 В или 80 мВ (читается: милливольт). Необходимо четко усвоить, что если каким-либо способом (например, пропуская ток через микроэлектрод) снизить мембранный потенциал на небольшую величину (примерно на 20 мВ), то от этого открываются ворота натриевых каналов. Натрия снаружи много, он положительно заряжен, а заряд внутри клетки имеет знак минус. От этого ионы натрия быстро входят в клетку и перезаряжают ее: теперь внутри клетки возникает знак плюс, а снаружи — минус. Это изменение мембранного потенциала называют *возбуждением нейрона*. Однако натриевые каналы устроены так, что их ворота открываются только на очень короткое время, а потом вновь за-



крываются. Как только натриевые каналы закроются, ионы калия начинают выходить наружу (ведь теперь снаружи знак минус) и восстанавливают исходный мембранный потенциал. Весь процесс возбуждения занимает в нейронах теплокровных животных около одной тысячной доли секунды.

Чтобы клетка возбудилась, надо каким-то образом снизить ее мембранный потенциал до определенного уровня. Если снизить потенциал на очень маленькую величину (например, на одну тысячную вольта), то возбуждение не наступит, так как натриевые каналы при этом не откроются. То минимальное изменение мембранного потенциала, которое необходимо, чтобы вызвать возбуждение нейрона, называют *порогом возбуждения*. Если говорят, что порог нейрона равен 15 мВ, то это значит, что при уменьшении мембранного потенциала на 15 мВ этот нейрон возбудится.

У нейронов есть отросток, по которому они передают сигнал к другим нервным клеткам или иным адресатам (к мышечным клеткам и др.); этот отросток называют *аксоном*. (У многих нейронов есть и другие отростки — дендриты, но их строение и функции мы рассматривать не будем.)

Какой же сигнал передается по аксону? Аксон в покое тоже имеет мембранный потенциал, равный примерно 80 мВ (плюс снаружи). Когда нейрон возбуждается и перезаряжается, между мембраной нейрона и аксона начинают течь токи, которые снижают мембранный потенциал начального участка аксона (рис. 2, а). Когда этот потенциал снижается на пороговую величину, мембрана начального участка аксона возбуждается и тоже перезаряжается. Но от этого начинает течь ток

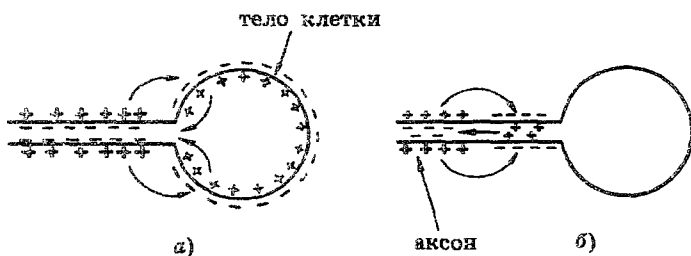


Рис. 2. Схема, поясняющая передачу сигнала от нейрона к его адресатам. Стрелки указывают направление тока: а — возбуждено тело нейрона, б — возбужден начальный участок аксона

между начальным участком аксона и следующим участком (рис. 2,б). Теперь возбуждается следующий участок и т. д.

Таким образом, по аксону *распространяется возбуждение* (тот же самый процесс имеет и другое название — распространение нервного импульса). Возбуждение распространяется от тела нервной клетки по аксону к конечным веточкам аксона, которые называют *терминалями*.

Что происходит с сигналом, передающимся по аксону, когда он достигает терминали? Терминаль аксона подходит к другому нейрону (его часто называют нейроном-адресатом), которому и предназначен сигнал. В месте окончания терминали имеется специальное устройство — *синапс*. Что такое синапс? Это кусочек мембраны терминали, кусочек мембраны нейрона-адресата и узенькая щель между ними — ее ширина равна обычно 20 нм (рис. 3).

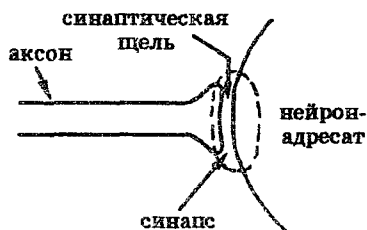


Рис. 3. Схематическое изображение синапса

Когда нервное возбуждение доходит до терминали и перезаряжает ее мембрану, из цитоплазмы терминали в *синаптическую щель* выбрасываются особые химические вещества, которые называются *медиаторами* или *переносчиками*; они и переносят сигнал от терминали к аксону-адресату. Молекулы медиатора диффундируют через синаптическую щель и достигают мембраны нейрона-адресата. (Как потом эти молекулы убираются из синаптической щели, мы разбирать не будем.) А на этой мембране расположены специальные ионные каналы. Ворота белковых молекул открываются, когда к ним присоединяется молекула медиатора. Если эти каналы пропускают ионы натрия (или и натрия и калия), то мембранный потенциал клетки-адресата снижается. Если это снижение достигает порогового уровня, то клетка-адресат возбуждается.

Синапсы, вызывающие возбуждение клетки-адресата, называют *возбуждающими синапсами*.

Однако терминаль может выделять медиаторы, действующие иначе. Если медиатор открывает такие ионные каналы, которые не снижают мембранный потенциал нейрона-адресата, а еще больше повышают его, то такой медиатор называют *тормозным*, соответствующий синапс называют *тормозным синапсом*, а возникающий при этом процесс называют процессом *торможения нейрона-адресата*. Пусть, например, медиатор откроет каналы для ионов хлора, которые несут отрицательный заряд и которых много в наружной среде. Ионы хлора входят внутрь нейрона и вносят с собой свой отрицательный заряд, а внутри клетки и так был знак минус; значит, величина мембранного потенциала станет больше (например, исходно она была равна 70 мВ, а после открывания хлорных каналов она стала равной 80 мВ).

Почему этот процесс называют процессом торможения? Дело в том, что такую клетку становится труднее возбудить. Пусть сначала исходный потенциал был 70 мВ, а порог равен 20 мВ; это значит, что, как только мембранный потенциал снизится на 20 мВ и станет равным 50 мВ, откроются натриевые каналы, и нейрон возбудится. Если на эту нервную клетку подействовал тормозной синапс и потенциал стал равен 80 мВ, то положение меняется. Теперь при снижении потенциала на 20 мВ (т. е. при том же самом возбуждающем воздействии) мембранный потенциал станет равным не 50, а 60 мВ, натриевые каналы не откроются и возбуждения не произойдет.

Таким образом, возбуждающие синапсы и тормозные синапсы действуют на нейрон прямо противоположным образом: возбуждающий синапс снижает имеющийся мембранный потенциал, а тормозной синапс повышает его.

Пусть на нейроне оканчивается один возбуждающий синапс такой силы, что он может возбудить нейрон. При действии этого синапса нейрон-адресат возбуждается. Пусть на том же нейроне кончается тормозной синапс такой же силы (т. е. вызывающий такой же сдвиг потенциала, но другого знака). Что будет, если на нейрон-адресат подействуют и возбуждающий и тормозной синапсы? Нейрон не возбудится, его потенциал не изменится. А что будет, если на этот нейрон

подействуют два возбуждающих сигнала той же силы и один тормозной? Теперь нейрон возбуждётся.

Рассматриваемый нами нейрон является *сумматором*, т. е. он складывает все сигналы, приходящие от возбуждающих и тормозных сигналов, причем эти сигналы имеют разные знаки; если принять условно, что сигналы от возбуждающих сигналов положительны, то сигналы от тормозных сигналов следует считать отрицательными. Тогда можно сформулировать следующее *условие возбуждения нейрона*:  $B + T \geq \Pi$ , которое словами можно прочесть так: если сумма воздействий всех возбуждающих и тормозных сигналов на нейрон больше или равна его порогу, то этот нейрон возбуждается.

Нейрон вырабатывает во всех своих терминалях один и тот же медиатор. Мы будем дальше считать, что нейрон образует на всех своих адресатах *единообразные* синапсы: либо только возбуждающие, либо только тормозные. Если нейрон образует возбуждающие синапсы, то он называется *возбуждающим нейроном*; если же нейрон образует тормозные синапсы, то его называют *тормозным нейроном*. Один и тот же нейрон не может быть возбуждающим и тормозным.

От чего зависит сила действия нейрона на свою мишень? Мы будем считать, что это воздействие зависит от числа синапсов, которые нейрон образует на нейроне-мишени. Если аксон ветвится и образует пять веточек терминалей и пять синапсов на мишени, то мы будем считать, что он действует на мишень в пять раз сильнее, чем другой нейрон, который образовал на мишени всего один синапс.

Теперь мы можем рассматривать сети из нескольких последовательно и параллельно соединенных нейронов. Каждый последующий может быть возбужден, если выполнено условие возбуждения, т. е. если он получает надпороговое воздействие. Но что стоит в начале такой цепи? Откуда получают сигналы самые первые нейроны?

Среди нервных клеток имеются особые нервные клетки, которые получают сигнал не от других нейронов, а из окружающей или внутренней среды, причем они могут возбуждаться под действием таких сигналов из среды. Эти нейроны называют *нейронами-рецепторами* или просто *рецепторами*.

Существует пять типов нейронов-рецепторов. Первый тип — *фоторецепторы*, т. е. нейроны, которые возбуждаются

под действием света; эти рецепторы обеспечивают работу органов зрения.

Второй тип — *механорецепторы*, т. е. нейроны, которые реагируют на механические воздействия. Такие рецепторы находятся в органе слуха, реагируя на воздействие звуковых волн. Механорецепторы находятся в органах равновесия, лежат в основе чувства осязания. Механорецепторы находятся в мышцах и измеряют степень их растяжения.

Третий тип — *химорецепторы*, которые реагируют на те или иные химические вещества; на них основана работа органов вкуса и обоняния.

Четвертый тип — *терморецепторы*, которые реагируют на тепло и холод (их называют тепловыми и холодовыми рецепторами).

Наконец, пятый тип — *электрорецепторы*, которые имеются у некоторых рыб, амфибий и даже млекопитающих (у утконоса).

А что стоит в конце нейронной цепи? В конце цепи находятся нейроны, которые действуют на исполнительные механизмы, на эффекторы, т. е. на мышцы или железы. Если нейрон действует на мышцу, то его называют *моторным нейроном* или *мотороном*.

При передаче сигнала по цепи нейронов возникает некоторая временная задержка — время прохождения сигнала от начала до конца цепи. Она складывается из времени проведения по аксонам и из времени передачи сигнала в синапсах (синаптическая задержка). Обычно основную роль играют именно синаптические задержки, по этой причине чем больше нейронов последовательно передают сигналы в цепи, тем больше времени требуется на передачу сигнала.

В этом разделе было кратко рассказано, как работает нейрон и как нервные клетки действуют друг на друга. Из-за краткости изложения многие важные детали здесь не рассматривались или рассматривались крайне упрощенно. Достаточно подробно все эти вопросы рассмотрены в книге М. Б. Беркинблита и Е. Г. Глаголевой «Электричество в живых организмах» (М.: Наука, 1988).

Особенно важно понять смысл следующих терминов: возбуждение, торможение, порог, синапс, условные возбуждения. Некоторые понятия, также имеющие важное значение для

понимания работы нервной системы, будут введены в ходе дальнейшего изложения.

## НЕМНОГО ИСТОРИИ

Нейронная сеть,

описывающая поведение бабочки крапивницы

В 1984 г. на биологической олимпиаде школьников в МГУ была предложена следующая задача: «Известно, что бабочка крапивница предпочитает температуру  $36^{\circ}\text{C}$ . Если на улице холодно и солнце не светит, бабочка сидит с закрытыми крыльями. Если холодно, но светит солнце, бабочка открывает крылья. Но, как только температура достигнет  $36^{\circ}\text{C}$ , бабочка складывает крылья. Нарисуйте схему соединения нейронов, которая обеспечивала бы такое поведение бабочки». Когда я предлагал эту задачу, то думал, что какая-то часть школьников с ней справится. Задача была дана выпускному классу и оказалась «убойной». Ни одной работоспособной схемы предложено не было, а многие школьники вообще не могли понять, что от них требуется.

Эта задача, как и другие задачи о нейронных схемах, не имеет однозначного ответа. Можно придумать много схем, удовлетворяющих ее условию. Придумаем одну из возможных.

Прежде всего надо решить, какие рецепторы и какие эффекторы мы будем использовать в схеме. Можно принять, что крыльями бабочки по аналогии с мышцами-антагонистами человека управляют две группы мышц: «опускатели» крыла и «подниматели» крыла.

Каждой группой управляют свои мотонейроны, которые мы обозначим  $MH_0$  и  $MH_1$  (рис. 4). Теперь нам надо выбрать рецепторы. Нам надо иметь сведения о солнечном свете и температуре тела бабочки. Выберем такие рецепторы: световой, который возбуждается, когда светит солнце (обозначим его буквой  $S$ , т. е. «свет» или «солнце»); тепловой, который возбуждается, когда температура бабочки равна или выше  $36^{\circ}\text{C}$  (обозначим его буквой  $T$ ); холодовой, который возбуждается, когда температура тела бабочки ниже  $36^{\circ}\text{C}$  (обозначим его буквой  $X$ ).

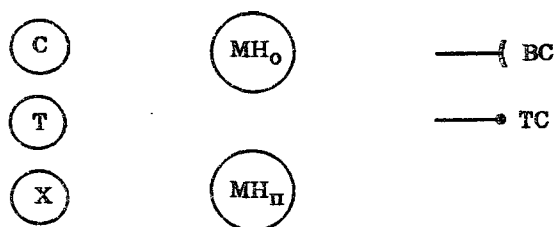


Рис. 4. Набор элементов, которые будут использоваться при построении нейронной сети, управляющей крыльями бабочки крапивницы:

МН<sub>0</sub> — мотонейроны опускатели крыла, МН<sub>н</sub> — мотонейроны поднимаатели крыла, С — рецепторы света, Т — тепловые рецепторы, Х — холодовые рецепторы, ВС — обозначение возбуждающих синапсов, ТС — обозначение тормозных синапсов

Наша задача состоит в следующем: необходимо так соединить эти рецепторы с мотонейронами, чтобы поведение сети соответствовало условиям задачи.

По условию задачи, крылья при свете раскрываются, поэтому соединим световой рецептор с МН<sub>0</sub> возбуждающим синапсом (рис. 5, а). Когда же температура поднимется выше 36°C и заработает тепловой рецептор, крылья должны закрыться. Значит, надо соединить рецептор Т с МН<sub>н</sub> возбуждающей связью (рис. 5, б). Мышцу-антагониста (опускателя крыла) надо при этом затормозить; для этого надо соединить тепловой рецептор с МН<sub>0</sub> тормозной связью. Но один и тот же нейрон, как говорилось выше, не может быть одновременно и возбуждающим и тормозным, поэтому для создания

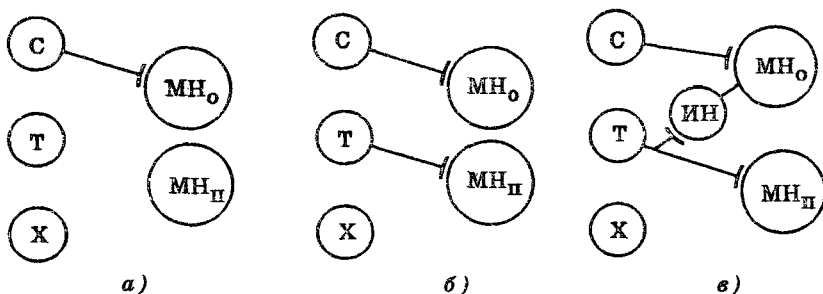


Рис. 5. Последовательные этапы (а — в) построения нейронной сети, управляющей поведением крыльев бабочки крапивницы (Ин — интернейрон)

торможения надо поместить в линию, ведущую от Т к МН<sub>0</sub>, тормозной вставочный нейрон (вставочный нейрон еще называют *интернейроном*) (рис. 5,а). Теперь, если будет и светло и тепло, МН<sub>0</sub> не будет работать, так как на него приходят равные по величине, но противоположные по знаку сигналы, которые не доведут его до порога.

Однако наша схема не полностью удовлетворяет условиям задачи: если на улице холодно и нет солнца, то, по условию, крылья должны быть закрыты, а из нашей схемы этого не следует. Теперь мы используем холодовой рецептор. Его надо соединить с МН<sub>II</sub> возбуждающей связью. Но в ситуации «холодно и светло» эта связь не должна работать, иначе она помешает опустить крылья. Итак, эта связь не должна работать, когда светит солнце. Значит, в схему придется ввести еще один интернейрон, который будет выключать эту линию, когда светит солнце.

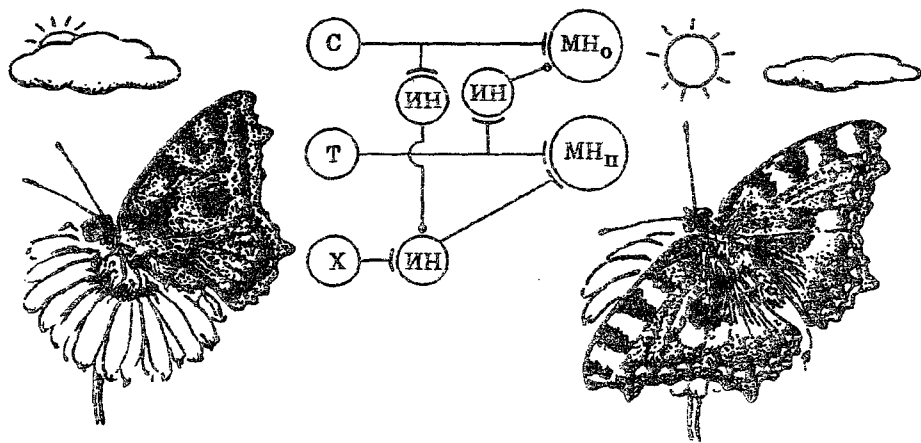


Рис. 6. Окончательный вариант нейронной сети, управляющей поведением крыльев бабочки крапивницы

Теперь наша схема полностью удовлетворяет условиям задачи.

На примере этой задачи можно выделить типичные этапы решения задач на нейронные сети:

- а) выбор необходимых рецепторов и эффекторов;
- б) попытки соединить их друг с другом возбуждающими и тормозными связями в соответствии с условиями задачи;



в) введение в схему возбуждающих и тормозных интернейронов, если прямое соединение только рецепторов и эффекторов не приводит к успеху;

г) проверка полученной схемы на соответствие всем условиям задачи (этого этапа решения мы не проводили).

На рис. 7 приведено другое решение той же самой задачи.

В этом решении использован *спонтанно-активный нейрон*, т. е. нейрон, который все время возбуждается сам по себе без всяких воздействий извне. (Обратите внимание на этот новый тип нейронов. Такими свойствами обладают не только некоторые нейроны, но и некоторые мышечные клетки. Например, сердца позвоночных животных периодически сокращаются потому, что в них имеются спонтанно-активные мышечные клетки.) Этот спонтанно-активный нейрон (на рисунке он обозначен СА) будет все время возбуждать МН<sub>П</sub> и тем самым все время закрывать крылья. Крылья будут закрыты всегда, кроме ситуации, когда одновременно возбуждены рецепторы Х и С; в этом случае они возбуждают интернейрон 2 (см. рис. 7); эта цифра обозначает порог данного интернейрона и тем самым указывает, что свет и холод поодиночке не способны его возбудить. Интернейрон 2 при возбуждении откроет крылья и через еще один вставочный тормозной интернейрон затормозит спонтанно-активную клетку. В этой схеме мы обошлись вместо трех всего двумя типами рецепторов, но зато нам потребовались спонтанно-активный нейрон и интернейрон с порогом 2.

Теперь подумаем, что же мы, собственно, сделали, решив эту задачу. Узнали ли мы, как нервная система бабочки на самом деле поддерживает температуру ее тела? Конечно, нет. Для этого нужно было бы не рисовать схемы на листке бумаги, а изучать работу нейронов реальной бабочки. Мы придумали схемы, которые показывают, как в принципе могла бы осу-

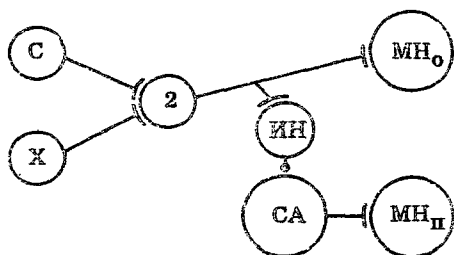


Рис. 7. Другой вариант нейронной сети, управляющей поведением крыльев бабочки крапивницы, также удовлетворяющий условиям задачи

ществляться регуляция температуры, но, скорее всего, у реальной крапивницы терморегуляция осуществляется как-то совсем иначе. Таким образом, мы решили скорее логическую, чем биологическую задачу.

Тогда возникает вопрос: имеет ли смысл связывать решение такого рода задач с биологией? По нашему мнению, имеет. Во-первых, обращение к биологии позволяет сформулировать задачи, которые интересно решать биологам. Во-вторых, обращение к биологии позволяет нам выбрать для построения схем такие элементы, которые в какой-то степени сходны с реальными нейронами. Наконец, в-третьих, некоторые схемы, о которых пойдет речь дальше, действительно встречаются в нервной системе (такие случаи оговорены в тексте).

В то же время нейронные сети, которые мы далее рассмотрим, в большинстве случаев будут очень упрощены и сильно отличаться от реальных. Если сравнивать их с нервной системой беспозвоночных, то это отличие выражается в том, что нейроны, которые мы будем использовать при построении сетей, довольно унифицированы; если они и отличаются друг от друга (например, порогами), то эти отличия не принципиальны. Между тем в нервной системе беспозвоночных часто используются нейроны с резко различающимися свойствами; отдельные клетки сильно специализированы и приспособлены для выполнения определенных функций. Если же сравнивать наши сети с нервной системой позвоночных животных, то важное отличие между ними состоит в том, что в наших сетях, как правило, используется небольшое число нейронов (несколько десятков), в то время как в сетях нервной системы позвоночных используются десятки тысяч нейронов.

Таким образом, нейронные сети, рассматриваемые ниже, имеют лишь косвенное отношение к реальным структурам нервной системы, и слово «нейрон» в большинстве случаев надо было бы писать в кавычках. Об этом необходимо все время помнить.

И все же работа с этими упрощенными сетями позволяет понять многие принципы функционирования реальной нервной системы. В дальнейшем мы еще раз вернемся к соотношению упрощенных нейронных сетей и реальных нейронных структур.

## § 2. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ИЗ ПОРОГОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СО СТУПЕНЧАТОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Решая задачу про бабочку крапивницу, мы в ряде случаев использовали интуитивные соображения; постараемся теперь более четко сформулировать ряд положений, из которых мы исходили при решении этой задачи.

Прежде всего необходимо оговорить свойства нейронов, которые мы использовали при построении схем. Мы молчаливо предполагали, что рецепторные нейроны обладают следующим свойством: пока внешнее воздействие ниже порога, рецепторы вообще не возбуждаются; когда внешнее воздействие выше порога, рецепторы вырабатывают сигнал всегда одной и той же величины (можно считать его некоторым единичным сигналом). На рис. 8 приведена характеристика (т. е. зависимость величины ответа от внешнего воздействия) теплового рецептора.

Обратим внимание на две ее особенности. Во-первых, на оси абсцисс есть отрезок (он идет до  $36^{\circ}\text{C}$ ), где ответ нейрона отсутствует, так как внешнее воздействие при этом ниже порога. Все устройства с такими свойствами мы будем называть *пороговыми элементами*.

Во-вторых, после того как порог внешнего воздействия достигнут, ответ нейрона скачкообразно принимает значение, равное единице, которое сохраняется при всех значениях внешнего воздействия. Такую характеристику нейрона мы будем называть *ступенчатой*.

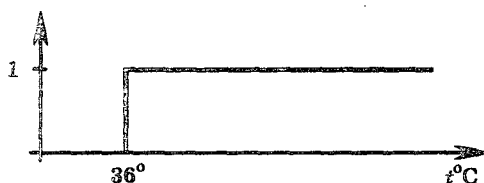


Рис. 8. Характеристика теплового рецептора. По оси абсцисс — температура, по оси ординат — величина ответа

### 2.1. Нарисуйте ступенчатые характеристики для холодного и светового рецепторов схемы, приведенной на рис. 6.

Теперь нам надо более точно оговорить свойства синапсов, образуемых рецепторами (и другими клетками) на нейронах-адресатах.

Мы будем считать, что единичный сигнал, идущий от рецепторов, создает в каждом отдельном синапсе тоже сигнал, равный единице. Если рецептор (или другой нейрон) образует на нейроне-адресате два синапса, то его воздействие на нейрон-адресат равно двум единицам. Каждый тормозной синапс создает воздействие, равное минус единице.

Опишем более подробно свойства интернейронов и выходных нейронов сети. Порог всех этих нейронов мы будем измерять в синаптических воздействиях. Если порог равен двум, то это значит, что нейрон возбудится, когда на него действуют два возбуждающих синапса, но не возбудится при действии одного синапса или возбудится при действии трех возбуждающих и одного тормозного синапсов; порог нейрона обозначается цифрой, стоящей внутри кружочка, изображающего нейрон (договоримся считать, что если цифра не стоит, то порог нейрона равен единице); ясно, что вместо обозначения СА можно просто ставить порог, равный нулю.

Будем считать, что характеристика нейрона — не рецептора — тоже является ступенчатой, т. е. при возбуждении нейрон выдает всегда один и тот же единичный сигнал. Спонтанно-активные нейроны тоже все время выдают один и тот же единичный сигнал. Любой нейрон непрерывно выдает единичный сигнал все то время, пока он остается возбужденным.

### 2.2. Нарисуйте характеристику нейрона с порогом, равным трем. Нарисуйте характеристику спонтанно-активного нейрона. Нарисуйте характеристику нейрона, который: а) не пороговый и не ступенчатый, б) пороговый и не ступенчатый, в) ступенчатый и не пороговый.

Теперь мы можем, используя описанные выше нейроны, перейти к решению некоторых задач на построение нейронных сетей.

2.3. Бабочки при контакте их лапок с раствором сахара вытягивают коботки и пьют раствор. После насыщения эту реакцию вызвать нельзя, а после голодания эта реакция вновь возникает. Какая нейронная сеть может обеспечить такую реакцию?

*Пояснения.* Первый этап решения задачи — выбор рецепторов и эффекторов. Один тип рецепторов — это хеморецепторы лапок, которые обнаруживают наличие сахара; другой тип рецепторов должен сигнализировать о насыщении (это могут быть тоже хеморецепторы, которые измеряют концентрацию сахара в гемолимфе, или это могут быть механорецепторы, которые измеряют степень растяжения кишечника, и т. д.; но для решения задачи нет необходимости конкретизировать тип этих рецепторов); можно также принять, что существует рецептор голода, если это вам нужно для построения сети.

Сложнее вопрос о том, что должно стоять на выходе сети. Можно попробовать придумать такую сеть, которая бы управляла мышцами коботки или пищевода, и придумать, какие мышцы нужны. Но можно пойти по другому пути. Будем считать, что выходным нейроном является такой специальный нейрон, при возбуждении которого бабочка начинает пить раствор. Такие нейроны действительно имеются у животных. Их называют *командными нейронами*. Примем, что на выходе сети стоит командный нейрон, вызывающий пищевую реакцию.

В последующих задачах, если прямо не сказано, что надо придумать сеть для управления конкретными мышцами, считайте, что на выходе сети находятся те или иные командные нейроны.

2.4. Встречный поток воздуха (например, от вентилятора) вызывает локомоцию ряда насекомых (локомоция — это перемещение тела животного в пространстве: ходьба, бег, полет, плавание и т. д.).

Если ноги насекомых при наличии воздушного потока касаются земли, то насекомые бегут, а если не касаются — летят. Придумайте нейронную схему для такого поведения, считая, что есть командные нейроны полета и ходьбы. При описании решения укажите, какие рецепторы вы использовали в сети.

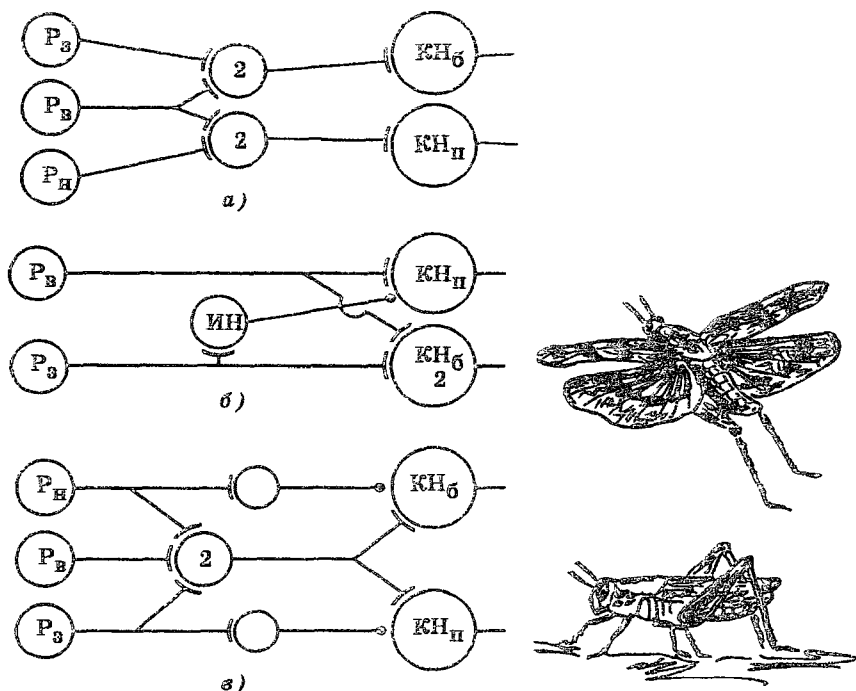


Рис. 9. Варианты (а — в) нейронных схем, запускающих полет или бег насекомых:

$P_3$  — рецептор прикосновения к земле,  $P_2$  — рецептор воздушной струи,  $P_1$  — рецептор, показывающий, что контакта с почвой нет,  $КН_6$  — командный нейрон бега,  $КН_П$  — командный нейрон полета

Вот несколько примеров решения задачи 2.4, которые были предложены учениками ВЗМШ и участниками субботнего лектория при МГУ (рис. 9).

2.5. В нейронной схеме задачи про бабочку крапивницу (см. рис. 6) испортился один из рецепторов — рецептор холода. При каких внешних условиях схема будет давать неверное поведение? В чем оно будет выражаться? Обоснуйте свой ответ, рассматривая работу схемы. Ответьте на те же вопросы, если считать, что вышли из строя рецепторы тепла и света.

2.6. Ответьте на вопросы задачи 2.5, используя нейронную сеть, приведенную на рис. 7 (рецептор тепла там рассматривать, естественно, не придется).

2.7. При температуре ровно  $36^{\circ}\text{C}$  по ошибке одновременно сработали оба рецептора — и тепла, и холода. Как будет вести себя при такой ошибке бабочка крапивница, если ее поведение обуславливается нейронной сетью, изображенной на рис. 6?

2.8. Если собака Бетти видит мясо в своей миске, она ест его. Если собака видит мясо, лежащее на столе, и хозяйки нет в кухне, она ест это мясо. Когда хозяйка в кухне, собака не трогает мясо, лежащее на столе. Придумайте нейронную сеть для такого поведения собаки.

*Пояснение.* Теперь вы легко догадаетесь, что на выходе сети должен стоять командный нейрон, вызывающий еду (если вам нужно, то можно ввести и командный нейрон — отказ от еды). Но как быть с рецепторами? Конечно, собака обнаруживает мясо с помощью хеморецепторов и фоторецепторов; с их же помощью она обнаруживает и хозяйку. Но вам будет достаточно трудно построить схему из нейронов, с помощью которой собака отличает хозяйку от других людей (например, ясно, что для этого требуется использовать память, а в наших сетях пока нет для этого подходящего способа). Для таких задач мы будем использовать так называемые *нейроны-детекторы*, или *нейроны-обнаружители*. Мы не будем заниматься вопросом о том, как собака узнает хозяйку, а примем, что на входе сети стоят такие нейроны-детекторы: нейрон, обнаруживающий, что мясо лежит в миске собаки (нейрон MM); нейрон, обнаруживающий мясо на столе (нейрон MS); нейрон, обнаруживающий хозяйку (X). Эти нейроны-детекторы мы и будем считать начальными нейронами сети.

Обратите внимание на то, что мы одним и тем же приемом облегчили себе жизнь, один раз заменив сложную работу мышц включением в сеть командных нейронов, а в другой раз — заменив сложную работу системы рецепторов включением нейронов-детекторов. Справданием такого приема может служить то, что и командные нейроны, и нейроны-детекторы действительно существуют в нервной системе разных животных. Вместе с тем у нас пока остается «за кадром» устройство тех нейронных сетей, которые приводят к включению того

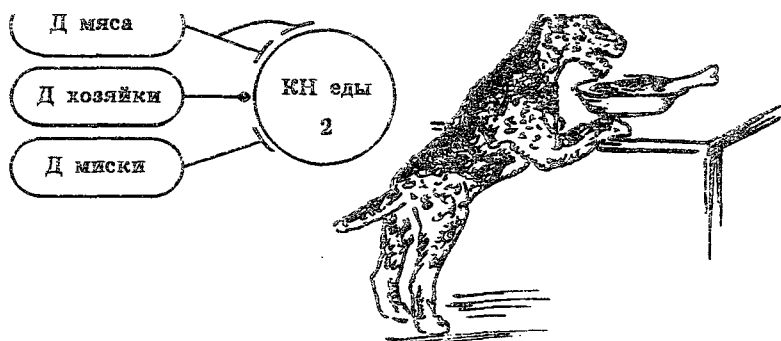


Рис. 10. Вариант нейронной сети, обеспечивающий поведение собаки Бетти, описанное в задаче 2.8:

Д — детектор, КН — командный нейрон

или много нейрона-детектора, и тех сетей, которые реализуют команды, идущие от командных нейронов.

Одним из участников зимней очной сессии школьников ВЗМШ 1991 г. было предложено оригинальное решение задачи 2.8 (рис. 10).

Это решение предполагает, что собака всегда готова есть мясо, когда нет хозяйки; что наличие хозяйки всегда тормозит поедание мяса, но наличие собственной миски компенсирует присутствие хозяйки. Это решение, впрочем, вызывает довольно очевидную критику: если принести миску собаки в кухню, то она должна хватать мясо со стола и в присутствии хозяйки.

Легко найти традиционные варианты решений, лишенные этого недостатка.

2.9. Лягушке на кожу кладут бумажку, смоченную слабым раствором кислоты. Она подергивает кожей, чтобы убрать раздражитель, но, конечно, не добивается успеха. Тогда она смахивает бумажку с кожи задней лапкой. Придумайте нейронную сеть, обеспечивающую такое поведение лягушки, считая, что есть командные нейроны «подергивания кожей» и «смахивания лапой». Наблюдения показывают, что существует такой промежуток времени, когда по-



дергивания кожей уже нет, а лапа еще не начала смахивание. Постарайтесь придумать такую сеть, чтобы она воспроизводила это наблюдение.

- 2.10. Известно, что сытый пресноводный моллюск ползет вниз, в глубину водоема, но при этом не опускается глубже двух метров. Проголодавшийся моллюск поднимается к поверхности воды. Однако это описание верно только для холодной погоды (ниже  $+10^{\circ}\text{C}$ ). Чем выше температура воды, тем меньше в ней растворено кислорода и тем на меньшую глубину уползает сытый моллюск. Известно, что моллюск перемещается за счет движения ресничек, выстилающих его ногу, причем имеются нейроны, управляющие по отдельности ресничками левой и правой половины ноги (это обеспечивает поворот моллюска). Нарисуйте нейронную сеть, которая обеспечивала бы описанное поведение моллюска при низких температурах. Постарайтесь затем так уложить эту сеть, чтобы она описывала его поведение при повышении температуры воды.

### Отступление в область «большой науки»

В современной науке есть так называемая теория автоматов. В ней рассматриваются устройства, имеющие некоторое число входов и некоторое число выходов. Такими автоматами являются и автомат для размена денег в метро, и вычислительная машина. В теории автоматов рассматривается множество разных задач, доказываются теоремы, имеющие общее значение. Большинство задач, которые мы предложили выше, в теории автоматов называются задачами о синтезе автоматов. Существуют достаточно общие правила, которые позволяют из элементов с заданными свойствами построить автомат, удовлетворяющий некоторым заданным условиям.

Можно привести такую аналогию. Существуют арифметические задачи, для решения которых нередко требуется немало смекалки. Но те же самые задачи можно решать по стандартным правилам, если использовать сведения из алгебры, и составлять для этих задач соответствующие уравнения. То-

чно так же мы предложили вам проявить смекалку и придумать в предложенных выше задачах разные нейронные сети. Но если сформулировать эти задачи как задачи синтеза автоматов, то они будут решаться по некоторым общим правилам, не требуя изобретательности.

Другой интересной задачей в теории автоматов является задача идентификации: воздействуя на разные входы автомата и наблюдая его ответы, надо установить его возможную внутреннюю схему.

- 2.11. Можно ли с помощью каких-то опытов установить, с какой схемой мы имеем дело в задаче о бабочке крапивнице: со схемой, изображенной на рис. 6, или со схемой, приведенной на рис. 7?

Теорией автоматов занимаются обычно математики. Но и перед инженерами часто возникают задачи, очень близкие к тем, которые вам пришлось решать выше. Так, конструируя лифт, инженер, должен придумать электрическую схему, в которой есть разнородные «рецепторы» (например, рецептор, сообщающий, что в лифте есть груз; рецептор, сообщающий, открыта или закрыта дверь лифта; рецептор, который сообщает, что лифт находится на пятом этаже, и др.), есть «командные нейроны» — кнопки, с помощью которых осуществляется вызов лифта или дается команда лифту идти на заданный этаж. В системе управления лифтом имеются и пороговые элементы с ступенчатой характеристикой — это реле (у реле есть пороговый ток, при котором оно «возбуждается», т. е. замыкает контакт; тогда через контакт идет сильный ток постоянной величины).

- 2.12. Придумайте «нейронную сеть», которая обеспечила бы правильное поведение лифта (для простоты считайте, что дом имеет всего три этажа).

- 2.13. Напишите на каком-либо языке программирования программу к задаче 2.12 и сопоставьте ее с соответствующей нейронной сетью.

- 2.14. Придумайте сами какое-то поведение животного и нейронную сеть, которая обеспечивала бы такое поведение.

Решив предложенные вам задачи, вы можете задать такой вопрос: конечно, построение нейронных сетей вполне интересная забава, но какое отношение она имеет к реальной нервной системе? Ведь ясно, что реальные нейроны различны, а у нас они все одинаковы; точно так же сильно отличаются и разные синапсы. А что, собственно, означает ситуация, когда нейрон в наших сетях все время выдает сигнал, равный единице? Ведь реальные нейроны работают отдельными импульсами, которые длятся тысячные доли секунды.

Что можно сказать по поводу такого рода вполне законных сомнений? Конечно, мы использовали в нейронных сетях очень грубые модели нейронов, упрощенные синапсы. Реальная нервная система гораздо сложнее. Но с помощью упрощенных моделей мы смогли понять, как в принципе нервная система может управлять теми или иными простыми формами поведения.

Вообще в науке постоянно приходится использовать упрощенные модели, отвлекаться от многих деталей, чтобы сначала понять самые основные, грубые черты явления, а уж потом постепенно, учитывая более тонкие детали, добиваться более глубокого понимания. Например, Ньютон вывел из закона всемирного тяготения законы движения планет (он показал, что они должны двигаться по эллипсам, нашел зависимость периода обращения от параметров орбиты и др.). При этом Ньютон учитывал только притяжение между данной планетой и Солнцем, но не учитывал взаимного притяжения планет. Впоследствии учет такого притяжения позволил уточнить результаты Ньютона и открыть новые планеты.

Ньютон открыл основные законы механики, но в дальнейшем оказалось, что для высоких скоростей движения, сравнимых со скоростью света, эти законы требуют уточнения.

Научные теории — это всегда более или менее упрощенные модели, соответствующие нашему уровню знаний. По мере развития науки эти модели совершенствуются и уточняются.

Рассмотренные нейронные сети в самой грубой форме моделировали работу мозга, показывая, как он в принципе может управлять поведением. В § 3 мы немного приблизимся к реальной нервной системе, используя более точные модели нервных клеток.

В приложении приведены задачи 2.15—2.27. Эти задачи придумали ученики биологического отделения ВЗМШ в 1990 г., отвечая на вопрос задачи 2.14. К каждой задаче дается решение. Но попробуйте сначала решить их самостоятельно, а затем сравните свой результат с решением автора задачи. Если в приведенном решении есть недостатки или ошибки, укажите их.

2.15. (Давиденко Ира). Лягушка хватается только мелкие летящие объекты, имеющие темную окраску (более темный фон, чем окружающая среда). В остальных случаях она не проявляет хватательного поведения. Схема, обеспечивающая такое поведение лягушки, приведена на рис. 11.

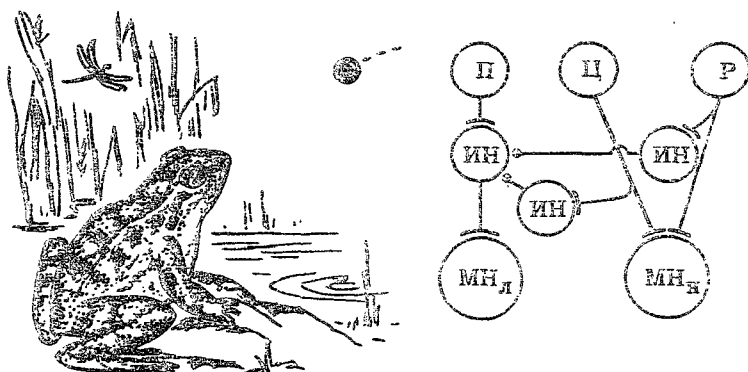


Рис. 11. Нейронная сеть — решение задачи 2.15:

П — нейрон, сообщающий, что объект движется; Ц — детектор окраски предмета (работает, когда предмет темнее фона); Р — детектор размеров движущегося предмета; МН<sub>л</sub> — мотонейрон «ловить»; МН<sub>н</sub> — мотонейрон «не ловить».

Если лягушка видит движущийся объект, то от клетки П через вставочный нейрон идет импульс к МН<sub>л</sub>. Однако если возбуждается клетка Ц или клетка Р, то они передают импульсы на свои тормозные нейроны (вставочные), которые блокируют интернейрон, принадлежащий связи клеток П—ИН—МН<sub>л</sub>. Клетки Р и Ц связаны с МН<sub>н</sub> возбуждающей связью.

Если один интернейрон может принимать импульсы от разных рецепторов Ц и Р, то схему можно упростить (рис. 12).

2.16. (Давиденко Ира). Чайки способны красть и псеждать яйца своих соросдищей. Чайка-грабитель различает яйца по форме и определяет, на какой территории — своей или чужой — они находят-ся.

Для насиживающей птицы при возвращении в гнездо выкатившихся яиц необходима информация о величине, окраске и форме, т. е. яйцо для птиц обладает четырьмя разными наборами сигнальных раздражителей: форма, величина, окраска, принадлежность к определенной территории (своей или чужой). Схема, обеспечивающая такое поведение чайки, изображена на рис. 13.

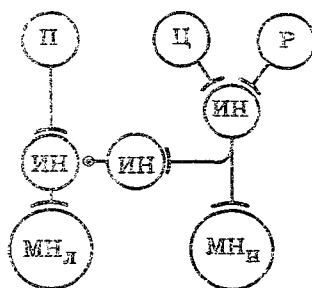


Рис. 12. Другой вариант решения задачи 2.15

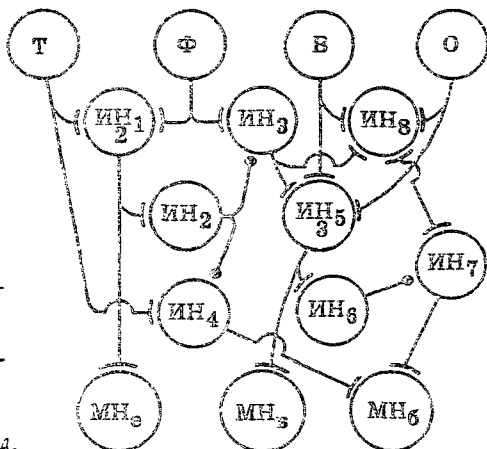


Рис. 13. Нейронная сеть — решение задачи 2.16:

Т — нейроны, сообщающие с чужой территории; Ф — о форме яйца; В — о величине яйца; О — об окраске яйца; МН<sub>1</sub> — мотонейрон «есть»; МН<sub>2</sub> — мотонейрон «высиживать»; МН<sub>3</sub> — мотонейрон «бросать» (оставить яйцо в покое)

Для удобства описания работы схемы пронумеруем некоторые интернейроны.  $ИН_1$  возбуждается только в том случае, если он получает импульсы от клеток Т и от Ф. Но отдельности импульсы от этих клеток возбудить вставочный нейрон не могут — высок пороговый уровень.  $ИН_5$  возбуждается, если получает вместе импульсы от клеток Ф, В и О. Рассмотрим три случая, обобщающие все остальные.

1. Возбуждаются рецепторы Ф и Т и какой-нибудь еще: или В, или О. Импульсы, поступившие от клеток Ф и Т, возбуждают интернейрон  $ИН_1$ . Интернейрон связан с  $МН_е$  возбуждающей связью. Также от  $ИН_1$  импульс поступит к  $ИН_2$ , возбудит его, в результате чего тот заблокирует  $ИН_3$  и  $ИН_4$ . Итак, если в цепи будет участвовать клетка Т, то может быть два варианта поведения: 1) птица бросит яйцо; 2) если будет еще участвовать в цепи клетка Ф — съест его.

2. Возбуждаются рецепторы Ф, В, О. Так как  $ИН_1$  не возбудится от импульса, идущего только от клетки Ф,  $МН_е$

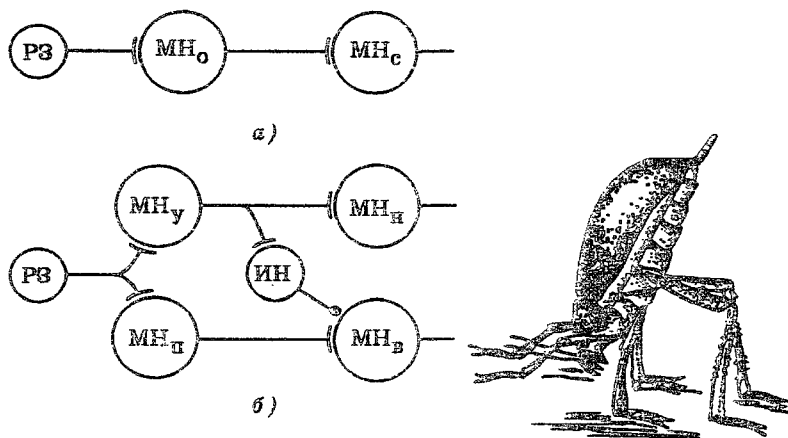


Рис. 14. Нейронные сети (а, б) — варианты решения задачи 2.17: а — РЗ сообщает об опасности, что ведет к принятию стойки; б — РЗ сообщает о приближении или об удалении хищника, что приводит к разным формам описанного выше поведения:

РЗ — зрительный рецептор;  $МН_о$  — мотонейрон регистрации опасности;  $МН_с$  — мотонейрон принятия стойки;  $МН_у$  — мотонейрон, регистрирующий удаление хищника;  $МН_п$  — мотонейрон приближения хищника;  $МН_н$  — мотонейрон принятия обычного положения;  $МН_в$  — мотонейрон выделения ядовитого секрета; ИН — интернейрон

уже не работает. Импульсы от клеток Ф, В и О поступают на вставочные нейроны 3, 5, 8. ИИ<sub>3</sub> возбуждается и передает импульс на ИИ<sub>5</sub>, который тормозит ИИ<sub>7</sub>, а к ИИ<sub>7</sub> поступает импульс от ИИ<sub>8</sub>. Далее импульс от ИИ<sub>5</sub> идет к МН<sub>2</sub> (связь возбуждающая).

3. Возбуждаются какие-нибудь два нейрона из Ф, В, О. Тогда возбуждятся ИИ<sub>3</sub>, который передает импульс на ИИ<sub>7</sub>, а затем импульс поступает на МН<sub>5</sub> и возбуждает его.

2.17. (Яковлев Роман). Я придумал поведение жука чернотелки. Когда жук видит опасность, он принимает стойку, поднимая вверх конец брюшка. Если хищник приближается, чернотелка выпускает ядовитый секрет желез, отпугивая хищника. Если хищник удаляется, чернотелка принимает свое обычное положение. Мне кажется, что поведение чернотелки можно описать с помощью нейронной сети двумя способами (рис. 14).

2.18. (Малков Алексей). У собаки в лаборатории выработали следующие рефлексy: если собаке давали пищу без каких-либо сигналов, то у нее наблюдалось слюноотделение, и пищу она ела; подача светового сигнала вызывала слюноотделение независимо от наличия пищи; звуковой сигнал сам по себе не давал

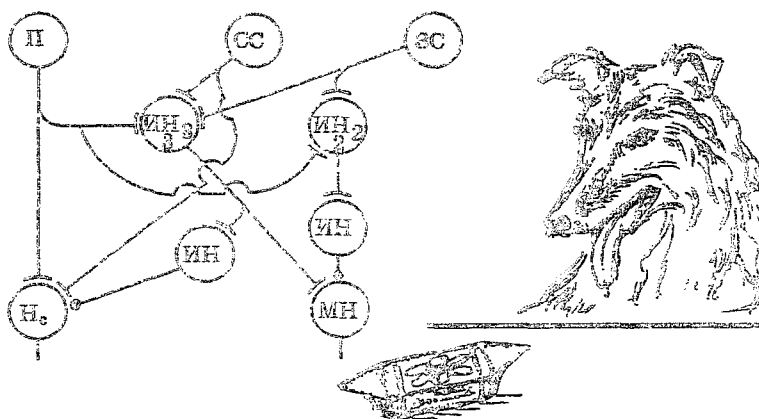


Рис. 15. Нейронная сеть — решение задачи 2.18:

Н. — группа нейронов, регулирующих слюноотделение; МН — моторнейроны, управляющие мышцами собаки при еде

никаких реакций, подача его вместе с пищей на слюноотделение тоже не влияла, и собака пищу не ела. Подача же вместе с пищей и звукового, и светового сигнала вместе вызывала подавление слюноотделения, но собака пищу ела. Предположим, что у собаки есть нейроны, которые возбуждаются, если собака видит пищу (П), если собака видит световой сигнал (СС) и если слышит звуковой сигнал (ЗС). Тогда нейронную схему, определяющую поведение собаки, можно изобразить так, как показано на рис. 15.

В этой схеме  $ИН_2$  может возбудиться только при действии на него двух возбуждающих синапсов,  $ИН_3$  — при действии на него трех возбуждающих синапсов.

- 2.19. (Семенова Оля). Предлагаю не очень сложное поведение: голодная собака может есть и суп, и мясо, причем, если она видит и суп, и мясо, она съедает сначала мясо. Если собака находится в состоянии средней сытости, то съедает только мясо. Если она сытая, то не ест ничего. Решение приведено на рис. 16.

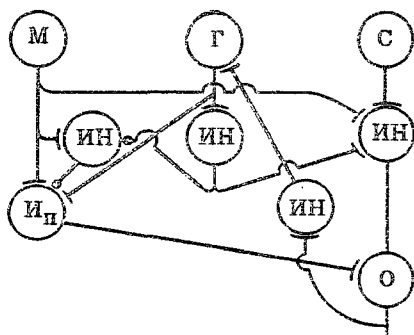


Рис. 16. Нейронная сеть — решение задачи 2.19:

М — нейрон, определяющий наличие мяса;  
С — нейрон, определяющий наличие супа;  
Г — нейрон, определяющий голод собаки;  
О — система управления поеданием пищи



2.20. (Ситникова Жена). Допустим, пастух вызел на пастбище ленивую корову. Корова ведет себя так: если рядом пастух, то она стоит и ест траву, а если рядом нет пастуха, то она ложится и начинает пережевывать жвачку. Но если корова насытилась, она никогда не станет есть траву, она будет только жевать жвачку, даже если рядом пастух. На рис. 17 приведена схема, содержащая решение этой задачи.

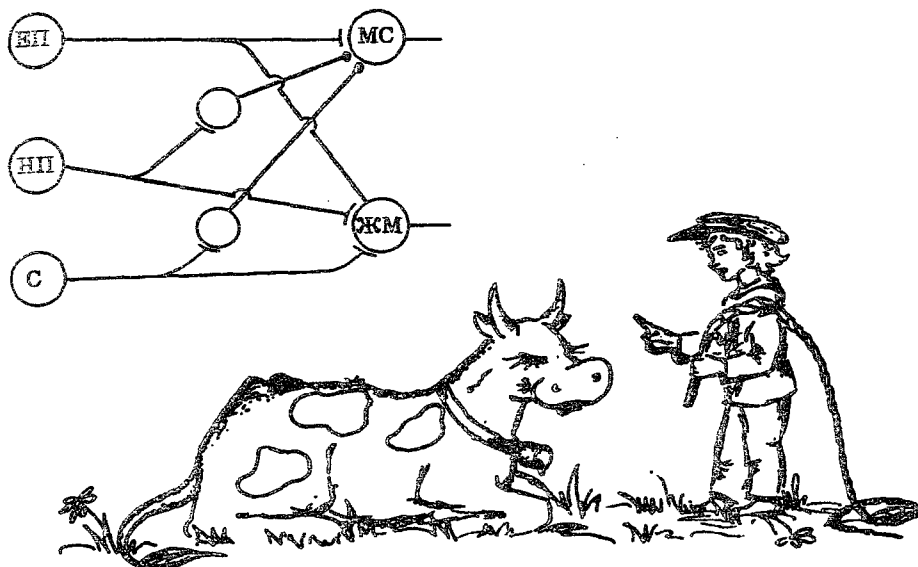


Рис. 17. Нейронная сеть — решение задачи 2.20:

НП — рецепторы, сообщающие об отсутствии пастуха; С — рецепторы, сообщающие о том, что корова наелась; ЭП — рецепторы, сообщающие о том, что есть пастух; МС — мышцы, с помощью которых корова встает; ЖМ — жевательные мышцы

Если пастух есть, то возбуждаются мышцы тела коровы, она встает и начинает есть траву. Но если корова уже сыта, то затормозятся мышцы тела, и корова будет лежать и жевать жвачку. Даже если рядом будет пастух, то корова не встанет, так как торможение и возбуждение сложатся, и в итоге мышцы не возбуждятся. Если рядом нет пастуха, то корова не встанет, а будет жевать траву.

2.21. (Ковалева Инга). Известно, что если молодой самец бабуин увидит корм, а рядом с ним других обезьян не будет, то съест его. Если бабуин увидит корм и приближающегося к нему вожака, то уступит ему дорогу. Увидев другого молодого самца, бабуин примет угрожающую позу, а если заметит последнего идущим вместе с вожаком, то отбежит с угрожающим видом. Обозначим рецептор, реагирующий на присутствие вожака, буквой В, на другого бабуина — М, спонтанно-активный нейрон, стремящийся все время создать угрозу, — У, СА, а мотонейрон, отвечающий за отход, — Н. Соответствующий вариант решения приведен на рис. 18.

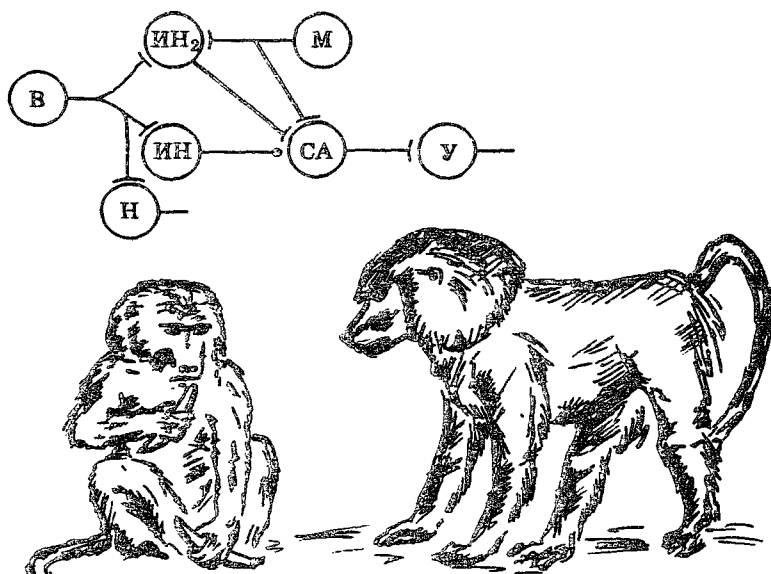


Рис. 18. Нейронная сеть — решение задачи 2.21

2.22. (Токарев Алексей). Пример: курица сидит на яйцах. Когда она сыта — сидит, когда голодная — отлучается ненадолго за пищей, но через определенное время возвращается, даже если не наелась, так как яйца остынут. Если появляется хищник, например

кошка, курица сидит на яйцах, даже если и голодна. Решение задачи показано на рис. 19.

1) Если курица сытая, то она сидит на яйцах (рецептор Я задействован).

2) Если курица голодная, то Г возбуждает  $ИН_1$ , который тормозит  $МН_Г$ , и Г возбуждает  $МН_П$  — курица идет за пищей.

3) У курицы кончилось время «обеденного перерыва» и задействуется В — вместе с Я возбуждает  $ИН_2$ , который возбуждается, если на него действуют сразу два рецептора, а  $ИН_2$  тормозит  $ИН_1$  — растормаживается  $МН_Г$ , и у курицы пропадает желание гулять и появляется тяга сидеть в гнезде.

4) Когда появляется кошка, то К совместно с Я возбуждает  $ИН_2$ , который тормозит  $МН_П$  и  $ИН_1$ , тормозящий  $МН_Г$ .

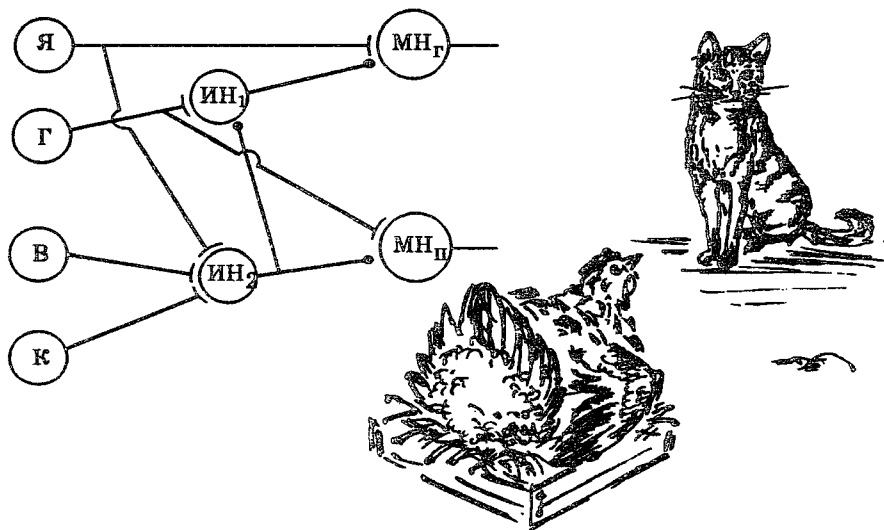


Рис. 19. Нейронная сеть — решение задачи 2.22:

Г — рецептор голода; Я — рецептор наличия яиц; В — рецептор, измеряющий время; К — рецептор наличия кошки;  $МН_Г$  — мотонейрон пребывания в гнезде;  $МН_П$  — мотонейрон похода за кормом;  $ИН_1$  и  $ИН_2$  — интернейроны

**Послесловие.** В данном случае повторное действие другого синапса на любой из нейронов может не тормозить или не

возбуждать его, а просто возвращать в состояние покоя, в котором он был до действия на него «первого» синапса; в этом состоянии его свойства проявляться не будут.

**2.23. (Дубровский Тимур).** Дождевой червь ведет себя следующим образом: если холодно, он уползает в глубь земли. Если тепло и влажность высокая, он выползает на поверхность. Если тепло, но влажность низкая, уползает в глубь земли. Если светит солнце, то червь, показавшись на поверхности земли, уползает в землю.

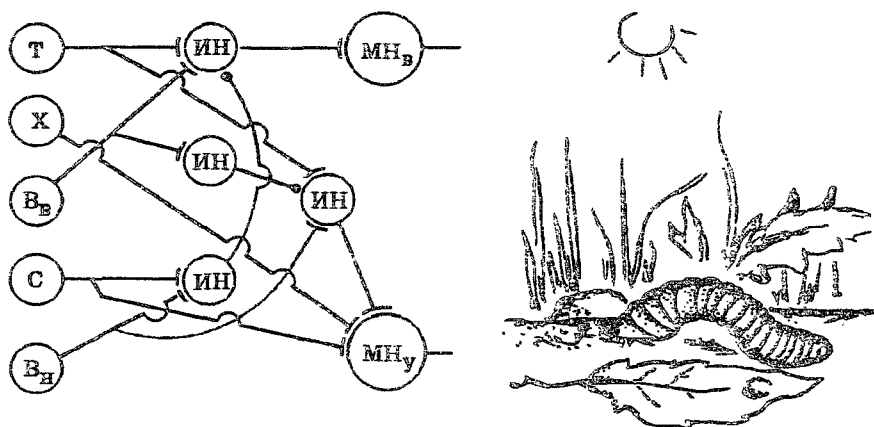


Рис. 20. Нейронная сеть — решение задачи 2.23

Составлю нейронную сеть дождевого червя. Допустим, у него есть рецепторы, реагирующие на солнце — С, на холод — Х, на тепло — Т, на низкую влажность — В<sub>н</sub>, на высокую влажность — В<sub>в</sub>, и группы мотонейронов, отвечающих за уползание в землю и выползание на поверхность. Уползание в землю — МН<sub>у</sub>, выползание на поверхность — МН<sub>в</sub>. Соответствующая нейронная сеть изображена на рис. 20, где ИН — интернейрон, МН — мотонейрон.

**2.24. (Лосев Игорь).** У многих насекомых существуют мышцы, которые могут закрывать и открывать дыхальца трахейной системы. Обнаружено, что чем

ниже влажность, тем сильнее закрыты дыхальца. В трахейных путях у этих насекомых имеются рецепторы, чувствительные к влажности входящего в них воздуха. При повышении содержания  $H_2O$  во входящем в трахейные пути воздухе реагируют рецепторы, более чувствительные к влажности воздуха,

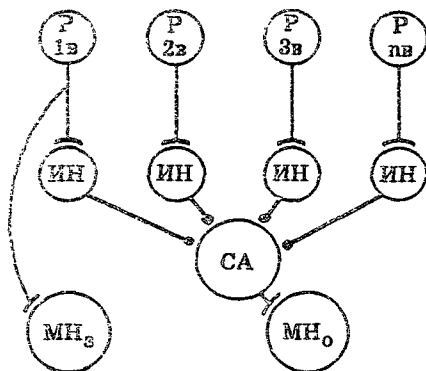


Рис. 21. Нейронная сеть — решение задачи 2.24

—  $P_{1в}$  (рис. 21), при большем повышении влажности входящего воздуха реагирует менее чувствительный рецептор влажности  $P_{2в}$  и т. д.

Рецепторы влажности при возбуждении подают импульсы на мотонейрон  $MН_0$ , руководящий открыванием дыхалец трахей, возбуждая их. Если влажность мала, то возбуждаются рецепторы, реагирующие только на малые концентрации  $H_2O$  в воздухе. В результате импульсы, которые подаются на мотонейроны, малы, но достаточны для преодоления порога возбудимости, и импульсы на мышечные волокна поступают с низкой частотой. Следовательно, вступают в работу только самые мелкие мышечные волокна. При возбуждении  $P_{1в}$  на  $MН_2$  поступят импульсы, возбуждающие  $MН_2$  — мотонейрон, закрывающий дыхальца. При этом работа  $P_{1в}$  активизирует (возбуждает) вставочный нейрон, тормозящий работу СА. В итоге дыхальца частично закрываются, так как ослабевает работа СА, возбуждающего  $MН_0$ , и, наоборот, возбуждается  $MН_2$ . Аналогично при вступлении в работу  $P_{2в}$ ,  $P_{3в}$  и т. д. происходят дальнейшее торможение СА и активизация  $MН_2$ , а в результате — дальнейшее закрытие дыхалец.

2.25. (Дубровский Дмитрий). Допустим, на какой-то планете живет некое существо — «прыгун». «Прыгун» ведет себя следующим образом. Если светло, он прыгает (и довольно высоко) и ест плоды, растущие на деревьях. Если темнеет, «прыгун» перестает прыгать и некоторое время ползает по земле, поедая плоды, упавшие с дерева. Если плоды заканчиваются, «прыгун» закапывается в землю, правда, не полностью. Утром, когда солнце освещает «прыгуна», он опять начинает прыгать. Составлю нейронную сеть «прыгуна». Предположим, у него есть рецепторы, реагирующие на свет — С, на плоды — П, на темноту — Т, и группы мотонейронов, отвечающих за поедание плодов —  $MH_{по}$ , за прыганье —  $MH_{п}$ , за ползание —  $MH_{полз}$ , за закапывание —  $MH_{з}$ . Нейронная сеть будет такой, как на рис. 22. В этой сети, я предполагаю, закапывание активируется спонтанно-активным нейроном. Закапыва-

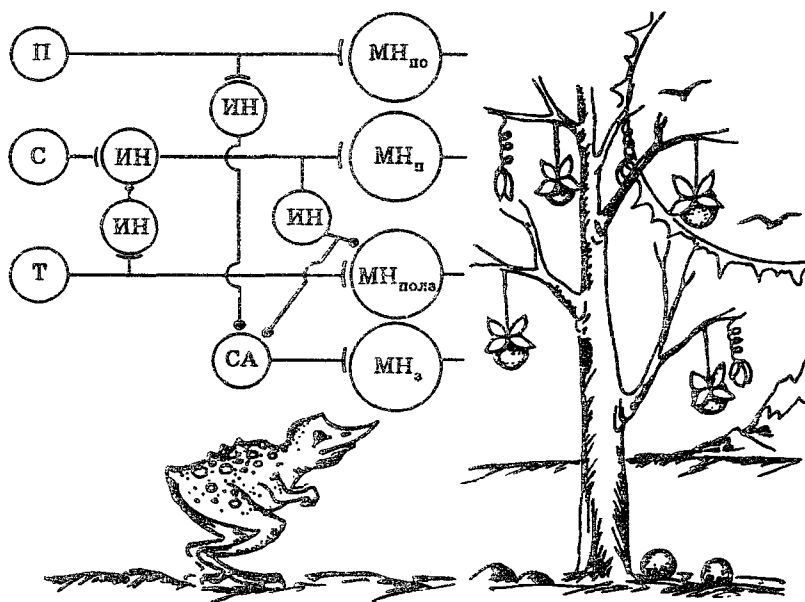


Рис. 22. Нейронная сеть — решение задачи 2.25

ние блокируется светом и наличием плодов. Ползание же активизируется наличием темноты.

2.26. (Мясоедова Светлана). Когда птица прилетает к гнезду, она отдает корм птенцу лишь в том случае, если видит, что это именно ее птенец, и слышит, что он кричит. Если она видит в гнезде любого птенца, но не слышит крика, она сидит на краю гнезда; если видит, что птенец чужой, и слышит крик, то она улетает. Решения задачи приведены на рис 23, а, б.

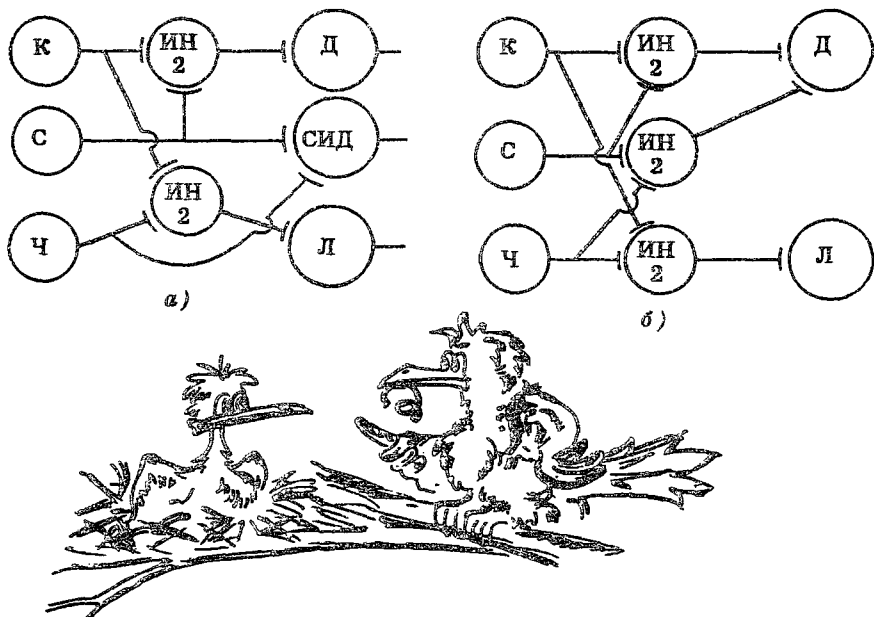


Рис. 23. Нейронные сети — варианты решения задачи 2.26:

К — нейрон, сигнализирующий о крике птенца; С — нейрон, сообщающий о том, что птенец свой; Ч — нейрон, сообщающий о том, что птенец чужой; Д — нейрон, заставляющий давать птенцу пищу; СИД — сидеть, Л — летать

2.27. (Лупушор Михаил). Акула Диди ведет себя так: 1) не нападает на дельфинов; 2) нападает на морских рыб, на аквалангистов, если они не вооружены колющим предметом или если возле них нет дельфинов.

Элементы, используемые при построении схемы: Р — нейрон, сообщающий, что существо, находящееся перед акулой, является морской рыбой, которую не следует бояться; А — нейрон, сообщающий, что перед акулой находится аквалангист; Д — нейрон, сообщающий, что перед акулой находится дельфин; К — нейрон, сообщающий, что у аквалангиста есть в руках колющий предмет (копье, гарпун и др.). Акулой управляют два типа мотонейронов: МНН — мотонейрон нападения и МНП — мотонейрон покоя.

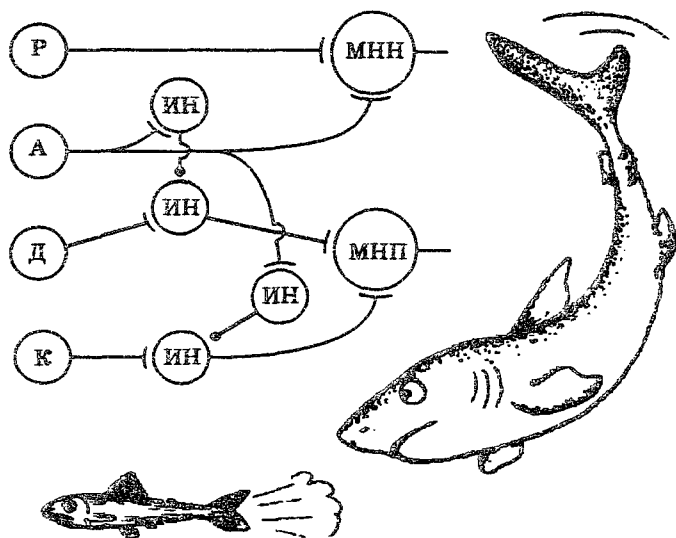


Рис. 24. Нейронная сеть — решение задачи 2.27

Поведение акулы описывается нейронной сетью, приведенной на рис. 24. Нам потребовалось четыре рецептора и четыре интернейрона.



### § 3. НЕЙРОНЫ С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассмотрим, что произойдет с реальной нервной клеткой, через которую пропускается постоянный ток. Постоянный ток меняет потенциал на мембране нейрона и, когда сдвиг потенциала достигает порога, вызывает возбуждение нейрона. После того как в нейроне возникает импульс, потенциал возвращается к уровню покоя, но продолжающий действовать постоянный ток вновь возбуждает нейрон и т. д. Таким образом, под действием постоянного тока в нейроне возникает *ритмический разряд*. Чем больше сила тока, пропускаемого через нейрон, тем выше частота разряда нейрона (рис. 25).

Но ритмический разряд возникает не только в искусственных условиях под действием постоянного тока. Так, в рецепторах в ряде случаев тоже возникает ритмический разряд. Например, в механорецепторах, которые находятся в мышцах,

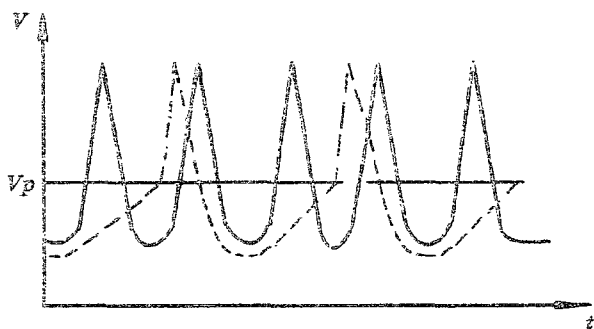


Рис. 25. Зависимость частоты ритмического разряда нейрона от силы деполяризующего тока. По оси абсцисс — время, по оси ординат — мембранный потенциал:

$V_p$  — пороговый потенциал. Сплошная кривая — раздражающий ток сильный, мембранный потенциал быстро достигает порогового значения; пунктирная кривая — раздражающий ток слабый, мембранный потенциал медленнее достигает порогового значения, в результате возникает ритмический разряд более низкой частоты

Элементы, используемые при построении схемы: Р — нейрон, сообщающий, что существо, находящееся перед акулой, является морской рыбой, которую не следует бояться; А — нейрон, сообщающий, что перед акулой находится аквалангист; Д — нейрон, сообщающий, что перед акулой находится дельфин; К — нейрон, сообщающий, что у аквалангиста есть в руках колющий предмет (копье, гарпун и др.). Акулой управляют два типа мотонейронов: МНН — мотонейрон нападения и МНП — мотонейрон покоя.

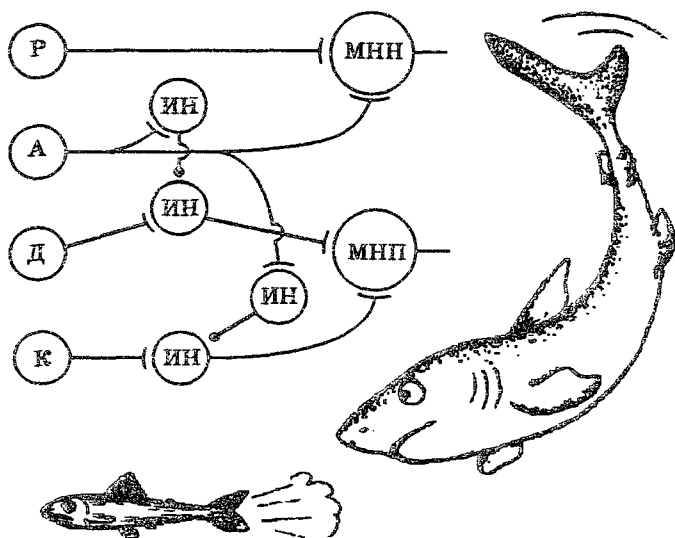


Рис. 24. Нейронная сеть — решение задачи 2.27

Поведение акулы описывается нейронной сетью, приведенной на рис. 24. Нам потребовалось четыре рецептора и четыре интернейрона.

### § 3. НЕЙРОНЫ С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассмотрим, что произойдет с реальной нервной клеткой, через которую пропускается постоянный ток. Постоянный ток меняет потенциал на мембране нейрона и, когда сдвиг потенциала достигает порога, вызывает возбуждение нейрона. После того как в нейроне возникает импульс, потенциал возвращается к уровню покоя, но продолжающий действовать постоянный ток вновь возбуждает нейрон и т. д. Таким образом, под действием постоянного тока в нейроне возникает *ритмический разряд*. Чем больше сила тока, пропускаемого через нейрон, тем выше частота разряда нейрона (рис. 25).

Но ритмический разряд возникает не только в искусственных условиях под действием постоянного тока. Так, в рецепторах в ряде случаев тоже возникает ритмический разряд. Например, в механорецепторах, которые находятся в мышцах,

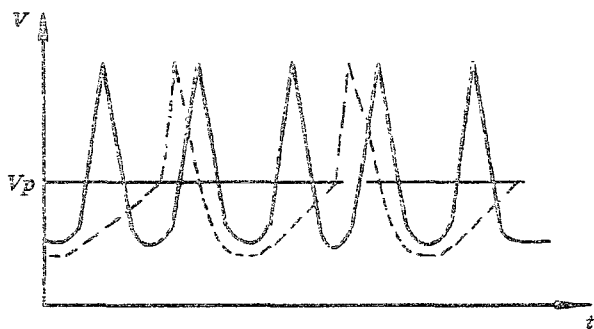


Рис. 25. Зависимость частоты ритмического разряда нейрона от силы деполяризующего тока. По оси абсцисс — время, по оси ординат — мембранный потенциал:

$V_p$  — пороговый потенциал. Сплошная кривая — раздражающий ток сильный, мембранный потенциал быстро достигает порогового значения; пунктирная кривая — раздражающий ток слабый, мембранный потенциал медленнее достигает порогового значения, в результате возникает ритмический разряд более низкой частоты

частота разряда тем выше, чем сильнее растянута мышца. Сведения о той величине, которую измеряет рецептор, передаются в мозг в этом случае *частотой импульсации*.

На любой нервной клетке оканчивается обычно много синапсов. Если работает достаточно заметная часть этих синапсов, то в мембране открыто много каналов, через которые течет ток. Если эти синапсы возбуждающие, то такой ток приводит к возникновению ритмического разряда нейрона. Точно так же если на нейрон действует всего несколько синапсов, но к этим синапсам приходят достаточно часто нервные импульсы по аксонам, то из синапсов выделяется достаточно много медиатора, и постсинаптический нейрон тоже начинает разряжаться ритмически.

Таким образом, *в качестве выходного сигнала нейрона естественно рассматривать частоту его разряда*. Эта частота может принимать любые значения, лежащие в диапазоне от нуля до некоторого предела. Дело в том, что нейрон не может разряжаться с как угодно высокой частотой. Сдин нервный импульс занимает примерно тысячную долю секунды. Значит, нейрон не может разряжаться с частотой, большей, чем тысяча импульсов в секунду, иначе импульсы должны были бы как-то налезать друг на друга, что совершенно невозможно. Но в действительности нейрон не может работать даже и с частотой 1000 имп/с, так как после каждого импульса возникает некоторый период невозбудимости (его называют *рефрактерным периодом*). И следующий импульс может возникнуть только через некоторый промежуток времени после предыдущего.

Основываясь на этих сведениях, рассмотрим следующую модель работы нейрона. Внешнее воздействие (в случае рецепторов — это действие света, запаха и т. д., а в случае других нейронов — это действие синапсов) может непрерывно меняться в некотором диапазоне. Если величина этого воздействия мала, нейрон не отвечает на него. Если же величина воздействия превышает некоторый порог, нейрон начинает ритмически разряжаться, причем частота разряда линейно возрастает с увеличением возбуждающего влияния. Наконец, при слишком больших воздействиях достигается некоторая максимальная частота разряда (наступает, как говорят, насыщение) и при дальнейшем увеличении воздействия выходная частота разряда нейрона не меняется (рис. 26).

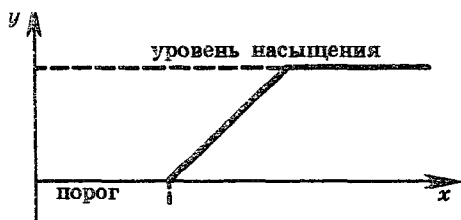


Рис. 26. Линейная характеристика нейрона с насыщением:

$x$  — сумма частот, поступающих на входы нейрона,  $y$  — его выходная частота

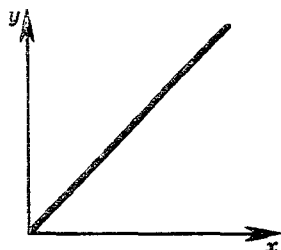


Рис. 27. Идеализированная линейная характеристика нейрона

Крутизна линейной части характеристики может быть разной. Если линейная часть нарастает очень круто, то мы получим пороговый элемент со ступенчатой характеристикой. Таким образом, характеристики нейронов, исследуемые нами в § 2, можно рассматривать как частный случай нейронов с линейной характеристикой.

Дальше мы примем следующие упрощения: 1) будем считать порог нейрона бесконечно малым и пренебрегать им; 2) будем считать, что линейная часть характеристики идет под углом  $45^\circ$ , т.е. если по синапсу к нейрону поступает частота  $x$ , то выходная частота импульсации в его аксоне  $y=x$ ; 3) будем считать, что величина внешних воздействий всегда меньше насыщающей.

Тогда мы получим характеристику нейрона, изображенную на рис. 27.

Что же умеет делать такой нейрон? Пусть по одному входу на него приходит сигнал  $x_1$ , а по второму входу сигнал  $x_2$  (т.е. первый входной нейрон разряжается с частотой  $x_1$ , а второй входной нейрон — с частотой  $x_2$ ), тогда суммарный сигнал, приходящий к нейрону, будет равен  $x_1 + x_2$ . А выходной сигнал такого нейрона ( $y$ ) равен входному, т.е.  $y = x_1 + x_2$ . Если второй входной нейрон — тормозной, то выходной сигнал будет равен разности  $x_1 - x_2$ . Тормозным сигналам мы будем приписывать знак минус.

Чем же отличаются такие нейроны с линейной характеристикой от нейронов со ступенчатой характеристикой, рассмотренных в § 2?

Нейроны со ступенчатой характеристикой могли складывать только целые числа (положительные и отрицательные), а затем сравнивать сумму с порогом и, если сумма выше порога, давать выход, всегда равный единице. Впрочем, эту выходную единицу нейроны со ступенчатой характеристикой могли умножать на целое число: это число было равно числу синапсов, которые они образовывали на нейроне-мишени.

Нейроны с линейной характеристикой могут складывать любые *действительные* числа (положительные и отрицательные), затем они сравнивают эту сумму с нулем. Если сумма больше нуля, то они выдают выходной сигнал, равный этой сумме. Как и нейроны со ступенчатой характеристикой, они могут умножать выходную величину на целое число (это целое число равно числу синапсов, которое образовано на нейроне-мишени). Такое умножение будет производиться, если считать, что все синапсы совершенно одинаковы. В ряде случаев в модели нейронных сетей вводится величина, которую называют *весом синапса*. Если вес синапса равен единице, то такой синапс передает сигнал без изменения; если вес синапса равен 1,5, то сигнал умножается на 1,5, и т. д. Но мы будем считать, что вес всех синапсов равен единице.

3.1. Мы выбрали модель нейрона, для которой  $y = x$ , иными словами, наклон характеристики равен  $45^\circ$ . Какой формулой будет описываться зависимость  $y = f(x)$ , если характеристика имеет другой угол наклона?

3.2. В действительности формула  $y = x$  неверна. Ведь если  $x$  — отрицательная величина, то  $y = 0$ . Попробуйте найти правильную формулу для выбранной нами модели нейрона.

Давайте теперь посмотрим, что могут делать сети из нейронов, имеющих характеристику, как на рис. 27.

3.3. На рис. 28 приведена нейронная сеть. Найдите значение выходной величины  $y$  при условии  $x_1 > x_2$ . Найдите значение величины  $y$  при условии  $x_1 < x_2$ . Какую же операцию осуществляет эта нейронная сеть?

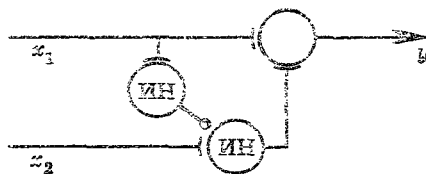


Рис. 28. Нейронная сеть к задаче 3.3

3.4. Ответьте на те же вопросы, что и в предыдущей задаче, для нейронной сети, приведенной на рис. 29.

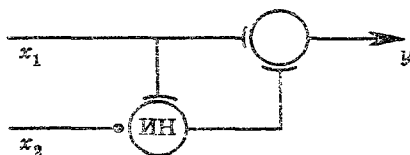


Рис. 29. Нейронная сеть к задаче 3.4

3.5. Придумайте нейронную сеть, которая дает выходной сигнал только при условии, когда  $x_1 = x_2$ .

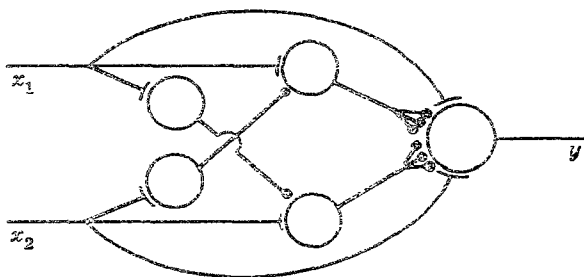


Рис. 30. Нейронная сеть к задаче 3.5

Решение этой задачи приведено на рис. 30. Такая сеть будет давать на выходе сигнал, когда  $x_1 = x_2$ , если тормозной синапс на выходном нейроне дает очень сильное торможение, гораздо большее, чем сигналы  $x_1$  и  $x_2$  (такие синапсы называют *запрещающими*). Однако в более реальных случаях

вес тормозных синапсов лишь в конечное число раз больше веса возбуждающих синапсов.

- 3.6. Пусть число тормозных синапсов на выходном нейроне в схеме (см. рис. 30) равно  $2_n$ . Тогда сеть будет пропускать сигналы, даже если  $x_1$  и  $x_2$  будут не в точности равны друг другу. Найдите «полосу пропускания», т. е. величину отличия входных сигналов друг от друга, при которой сеть выдает выходной сигнал в зависимости от величины  $n$ .

Такие схемы, как на рис. 28 — 30, называются схемами непрерывной логики. Схема на рис. 28 пропускает на выход наибольший сигнал из двух входных; она обозначается так:  $y = \max(x_1, x_2)$ . Схема на рис. 29 пропускает наименьший сигнал из двух входных; она обозначается так:  $y = \min(x_1, x_2)$ . Наконец, схема на рис. 30 обозначается так:  $y = \text{eqv}(x_1, x_2)$ ; (eqv — эквивалентность).

Эта и многие другие схемы нейронной логики были придуманы советским ученым Н. В. Позыным. Дальше мы увидим, как схемы непрерывной логики могут использоваться для решения разных биологических задач.

- 3.7. Придумайте схему, которая имеет три входа и дает выходной сигнал только при условии  $x_1 = x_2 = x_3$ .

## Детекторы и нейронные сети

Во многих задачах § 2 мы использовали нейроны-детекторы; например, в задаче 2.8 про собаку Бетти нам потребовались детекторы мяса, миски и хозяйки. Там мы не обсуждали вопрос о том, как могут быть устроены такие детекторы. Сейчас мы рассмотрим этот вопрос. Но ограничимся лишь детекторами, позволяющими обнаруживать более простые признаки, чем «хозяйка» или «мясо на столе».

Рассмотрим задачу, связанную с цветным зрением.

Известно, что животное, обладающее всего одним типом зрительных рецепторов, не имеет цветного зрения. Пусть имеется животное, обладающее двумя типами колбочек (как дальтоник). Каждая колбочка соединена со своим нейроном. Частоты разрядов таких нейронов, соединенных с разными типами колбочек, по-разному зависят от длины волны света (рис. 31).



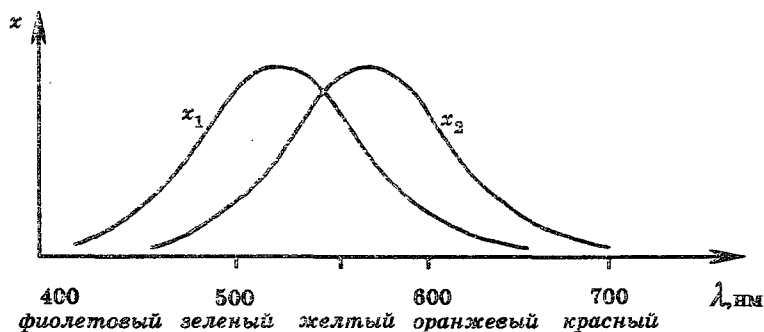


Рис. 31. Зависимость частоты разряда нейронов, соединенных с разными типами колбочек, от длины волны света:

по оси абсцисс — длина волны света; по оси ординат — частота разряда соответствующего нейрона ( $x_1$  и  $x_2$ )

Кривая  $x_1$  дает частоту разряда для нейронов, соединенных с одним типом колбочек, а кривая  $x_2$  — для нейронов, связанных со вторым типом колбочек.

Под осью абсцисс указаны цвета, которые видит человек, когда на его глаз падает свет с соответствующей длиной волны.

3.8. Приведите две причины, по которым организм с одним типом колбочек, имеющих такую же кривую спектральной чувствительности, как на рис. 31, не сможет различать цвета.

Нервная система нашего гипотетического животного с двумя типами колбочек определяет цвет, сравнивая сигналы от нейронов типа 1 и типа 2. Будем называть эти цвета так же, как цвета, воспринимаемые человеком при той же длине волны света.

3.9. Придумайте нейронную сеть, которая реагировала бы на желто-оранжевый цвет (при котором пересекаются кривые для  $x_1$  и  $x_2$ ) и не реагировала бы ни на какие другие цвета.

Очевидно, что выходной нейрон этой сети и будет являться детектором желто-оранжевого цвета.

3.10. Придумайте нейронную сеть, которая реагировала бы только на желтый цвет, когда частота работы нейронов типа 1 ровно в два раза больше, чем частота работы нейронов типа 2.

3.11. Какой должна быть нейронная сеть для определения цвета, если при этой длине волны частота работы нейронов одного типа в 2,5 раза больше, чем частота импульсации нейронов второго типа?

Рассмотрим еще одну задачу, связанную с детекторами в зрительной системе. Пусть поле зрения делится на две половины — левую и правую. Пусть на каждую половину поля зрения проецируется светлый круг некоторого диаметра (рис. 32). Чем больше диаметр круга, тем больше рецепторов возбуждается. Сигнал от рецепторов поступает к нейронам-сумматорам, так что частота работы этих сумматоров  $x_1$  и  $x_2$  пропорциональна площади кругов (для простоты будем считать коэффициент пропорциональности равным единице). Итак, у нас есть два входных сигнала: первый равен площади первого круга, второй — второго.

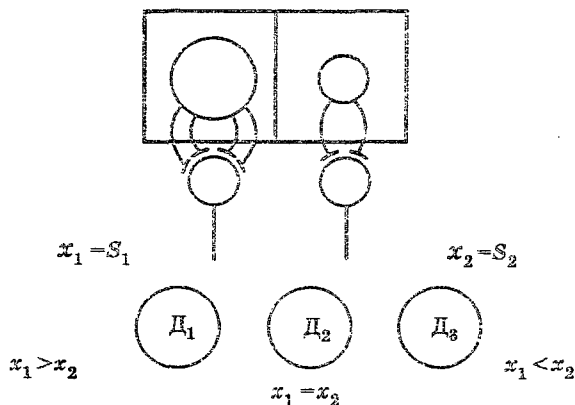


Рис. 32. К задаче о нейронной сети, определяющей соотношение площадей двух окружностей

3.12. Придумайте нейронную сеть, на входе которой были бы сигналы, приходящие от нейронов-сумматоров, а на выходе стояли бы три нейрона-детектора. Первый нейрон работает тогда, когда  $x_1 > x_2$ , второй когда  $x_1 = x_2$ , и третий — когда  $x_1 < x_2$ .

3.13. Придумайте нейронную сеть, на выходе которой стоит детектор, обнаруживающий круг, размеры которого ( $S$ ) лежат в некоторых заданных пределах  $S_1 < S < S_2$ .

3.14. Придумайте нейронную сеть, на выходе которой стоит детектор, реагирующий на все мелкие предметы (т. е. такие объекты, площадь ( $S$ ) которых меньше некоторой  $S < S_1$ ).

3.15. Придумайте нейронную сеть, на выходе которой стоит детектор, реагирующий только на большие объекты, площадь ( $S$ ) которых больше заданной ( $S > S_1$ ).

Известно, что у амфибий уже на уровне сетчатки имеются нейроны-детекторы, которые обнаруживают мелкие движущиеся предметы (добычу); эти детекторы запускают реакцию охоты. Имеются у амфибий и другие детекторы, которые реагируют на крупные движущиеся предметы (на потенциальную опасность) и запускают реакцию бегства. В первом приближении придуманные нами сети задач 3.14 и 3.15 могут рассматриваться как модели детекторов амфибий.

Ясно, что придуманный нами «детектор мелкого предмета» (задача 3.14) реагирует только на изображение предмета на сетчатке. Он не может отличить маленький и близкий объект от большого и далекого (их изображения будут иметь одинаковые размеры на сетчатке). Но было бы хорошо заранее отличить добычу, находящуюся рядом, от врага, который пока еще находится далеко.

3.16. Придумайте сеть, детектор которой реагирует только на маленькие предметы, независимо от того, близко или далеко от глаза находятся эти предметы.

3.17. Животные определяют направление на источник звука, используя ряд характеристик звука, в частности его громкость. Если источник звука находится прямо перед животным, громкости звука, воспринимаемые и левым и правым ухом, равны друг другу (рис. 33). Придумайте сеть для детектирования источника звука, расположенного прямо перед животным.

3.18. Скорее всего, сеть, придуманная вами к задаче 3.17, не будет отличать источников звука, расположенных прямо перед носом и прямо позади хвоста (и в том и в другом случае сигналы, поступающие к правому и левому уху, равны между собой). Как же жи-

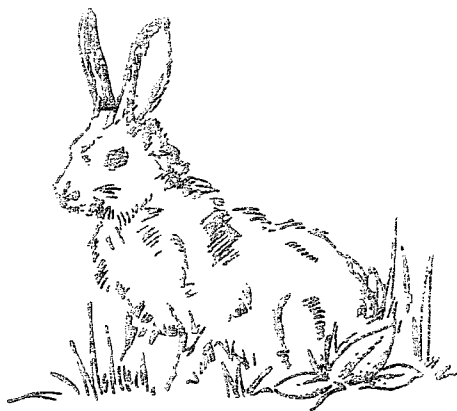


Рис. 33. Заяц пытается определить положение источника звука

вотному отличить направление на источник звука, находящийся перед ним, от источника звука, находящегося позади него? Предложите соответствующий прием и соответствующую сеть. (Звук, приходящий слева, сильнее возбуждает рецепторы левого уха, так как рецепторы правого уха частично экранированы от приходящего звука головой животного.)

Вернемся к задаче 3.12, т. е. к устройству, которое сравнивает большие и маленькие круги (или к задачам 3.14 и 3.15). Там мы предполагали, что суммарный сигнал зависит только от площади круга. Но очень часто сигнал сумматора зависит еще и от яркости круга. Маленький, но ярко освещенный круг может давать такой же сигнал, как и большой круг, но слабо освещенный.

Есть два способа сделать более надежный детектор.

3.19. Можно придумать такое устройство, которое превращает внешний сигнал любой величины в некоторый постоянный сигнал (например, в единичный). Если мы поставим после каждого рецептора света такое устройство, тогда суммарный сигнал от всех рецепторов будет зависеть только от площади круга.

Придумайте две разные конструкции, превращающие входной сигнал разной величины в константу.

3.20. Вторым способом сделать более совершенный детектор площади состоит в том, чтобы учесть уровень освещенности. Надо считать, что среди рецепторов разбросаны такие, которые не дают входа к сумматору, отвечающему за площадь круга, а соединены с другим устройством, определяющим яркость. Детектор яркости должен давать сигнал, который не зависит от числа задействованных рецепторов (можно считать, что он должен вычислять среднее арифметическое значение всех сигналов от рецепторов яркости). Дальше надо придумать устройство, которое определяло бы верно площадь круга, учитывая значение яркости. Попробуйте решить эти две задачи (о детекторе яркости и о детекторе площади с учетом яркости).

Заметим, что тут нам встречается способ, который широко используется реальной нервной системой. Этот способ состоит в том, что в органах чувств (зрения, слуха и др.) обычно имеется несколько разных параллельных каналов, по которым идет обработка информации с разных свойств внешних объектов. Например, в зрительной системе есть канал, который передает сведения о цвете предметов, есть канал, который занят обработкой информации о форме предметов, и т. д.

Заметим, что при построении разных детекторов, связанных с изображением предметов, мы используем не только свойства нейронов, но и некоторые геометрические соображения. Например, когда мы хотим измерить площадь, то присоединяем все рецепторы к сумматору.

3.21. Придумайте детекторы, которые будут сообщать, что на поле рецепторов проецируется горизонтальная линия, вертикальная линия или линия, под углом  $45^\circ$ .

Как отличить маленькую и яркую вертикальную линию от большой, но слабо освещенной?

3.22. Придумайте устройство, которое сообщало бы нам, что в поле зрения находится вертикальная желто-оранжевая линия.

Детекторы принято делить на детекторы простых признаков (цвета, угла наклона линий и т. д.) и на сложные детекторы, которые сообщают о наличии объекта, описываемого некоторой

совокупностью признаков. В разных отделах нервной системы находятся детекторы разной степени сложности. Например, в височной области мозга человека и обезьяны имеются нейроны, которые меняют частоту разряда лишь в том случае, когда в поле зрения попадает лицо. Эти нейроны специально предназначены для узнавания объекта «з лицо». Комбинируя много простых признаков, мы могли бы придумать некоторый сложный детектор, который реагировал бы только на изображение лица. (Конечно, это очень непростая задача.) Однако совсем другое дело — узнавание конкретного человека (Ивана Петровича Сидорова). Чтобы узнать конкретного человека, надо сравнить его лицо или его фотографию с образом, который хранится в памяти. А мы пока не рассматривали такие сети, которые обладают памятью.

Рассмотрим еще один прием, который использует нервная система при обработке изображений и детектировании их признаков — *нейронные сети с латеральным торможением*.

В 1949 г. английский биолог Хартлайн изучал работу глаза морского беспозвоночного — мечехвоста (это крупное животное, сходное с вымершими трилобитами). Он освещал одиночные рецепторы глаза мечехвоста и регистрировал частоту разряда в аксонах, идущих в мозг (рис. 34,а). Если освещать одиночный рецептор, то регистрируется некоторая частота разряда. Если же дополнительно осветить соседний рецептор, то частота разряда в первом аксоне убывает. Таким образом, соседние рецепторы взаимно тормозят друг друга. Такую сеть и называют сетью с латеральным торможением; она изображена на рис. 34,б.

Было показано, что при освещении двух рецепторов частоты их разряда хорошо описываются следующей системой линейных уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = e_1 - K_{2,1} x_2, \\ x_2 = e_2 - K_{1,2} x_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1$  — частота разряда первого рецептора,  $x_2$  — второго рецептора;  $e_1$  и  $e_2$  — те частоты разрядов, которые наблюдаются в отсутствие освещения соседа;  $K_{2,1}$  — число, характеризующее тормозное действие второго рецептора на первый,  $K_{1,2}$  — число,

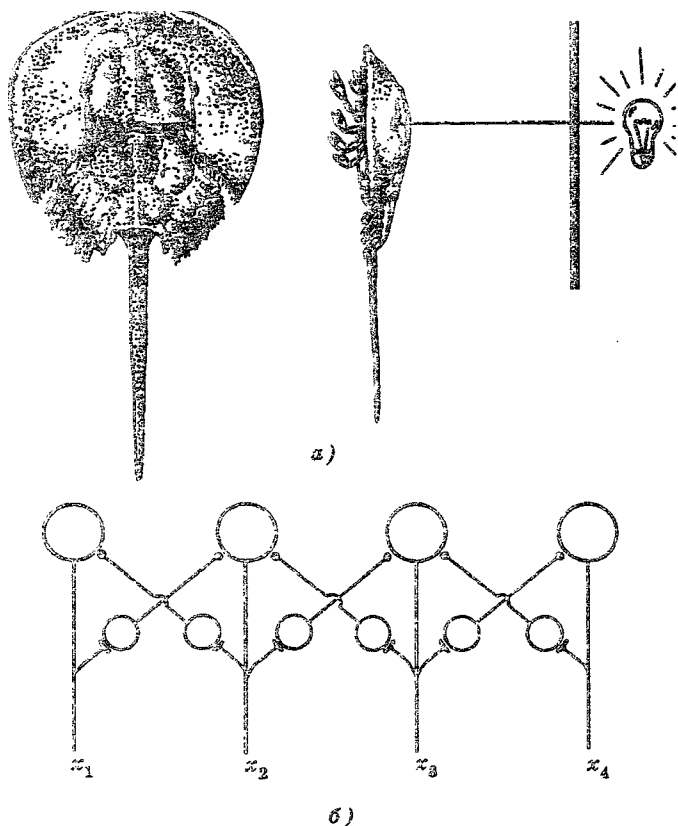


Рис. 34. Схема опыта с освещением рецепторов глаза мечахвоста (а) и нейронная сеть с латеральным торможением (б)

характеризующее тормозное действие первого рецептора на второй.

На рис. 34 указаны тормозные связи только между ближайшими соседями. В действительности такие тормозные связи могут тянуться и к достаточно отдаленным рецепторам. При этом коэффициенты торможения тем меньше, чем дальше рецепторы отстоят друг от друга, т. е.  $K_{1,2} > K_{1,3} > K_{1,4}$  и т. д. Законы, по которым идет такое убывание коэффициента торможения в зависимости от расстояния, могут быть разными.

Сети такого рода были в дальнейшем обнаружены в сетчатке разных животных (как беспозвоночных, так и позвоночных),

а также в рамках раздела нервной системы. Широкая распространенность нервных сетей этого типа показывает, что они могут выполнять какие-то важные функции.

Прежде чем перейти к анализу этих функций, заметим, что при возбуждении нескольких нейронов сети их взаимодействие описывается уравнениями того же типа, что и уравнение (1). Например, при освещении трех нейронов возбуждение первого из них описывается уравнением:

$$x_1 = e_1 - K_{2,1} x_2 - K_{3,1} x_3 \quad (2)$$

От того, что в работу включился третий нейрон, коэффициент  $K_{2,1}$  не меняется.

Пусть теперь на сеть рецепторов с латеральным торможением падает свет. Профиль интенсивности света изображен на рис. 35. Крутая наклонная линия — это граница «темноты — света» или граница яркого и менее яркого света. Такая граница всегда бывает более или менее размытой за счет рассеяния света.

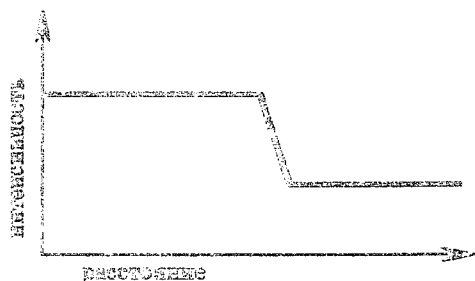


Рис. 35

3.23. Попробуйте с помощью вычислений или рассуждений найти значения величин  $x_1$ ,  $x_2$  и т. д., которые возникают под действием такого распределения света. Как будет выглядеть график зависимости  $x_1$ ,  $x_2$ , ...,  $x_n$  от расстояния? Какую функцию может выполнять такая сеть?

Если вы правильно решили эту задачу, то должны были прийти к следующим рассуждениям и выводу. На границе, где есть перепад освещенности, более освещенные нейроны сильнее тормозят своих соседей, а эти соседи, получая меньше света, слабо возбуждаются и слабо тормозят нейроны, расположенные слева; это подчеркивает границы освещенности. Разница возбуждения нейронов, лежащих по разные стороны границы, оказывается даже больше, чем реальная разница освещенностей.



В результате уровни возбуждения нейронов сети распределяются так, как показано на рис. 36.

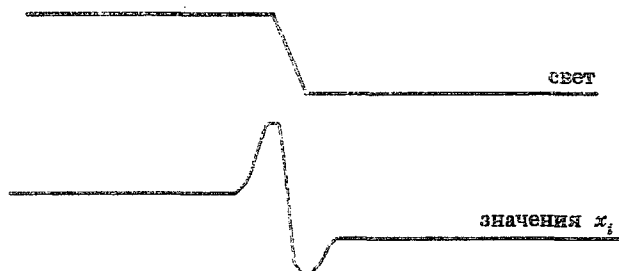


Рис. 36. На одну полсвязку ливнейной нейронной сети с латеральным торможением подается свет, другая полсвязка остается неосвещенной:

сверху показано распределение интенсивности света, снизу — распределение уровня возбуждения нейронов сети, возникающего под действием света

Мы рассмотрели случай, когда нейроны вытянуты в линию. Если рассмотреть двумерную сеть, то круг будет преобразовываться так, как показано на рис. 37.

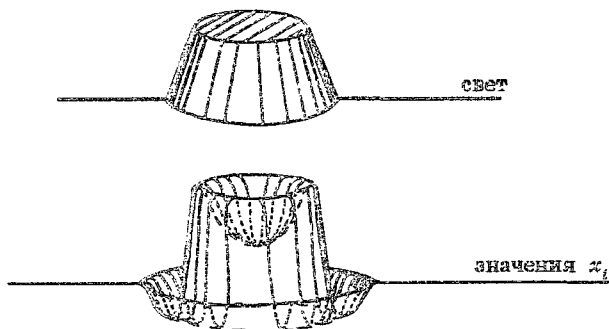


Рис. 37. Освещенный участок двумерной сети с латеральным торможением — круг:

сверху — распределение интенсивности света, снизу — распределение уровня возбуждения нейронов сети

Если подать это возбуждение еще на одну сеть с латеральными тормозными связями (а если потребуется, то и еще на

одну), то вместо круга мы получим окружность, т. е. такая сеть будет выделять контуры предметов.

Не следует думать, что экраны встречаются только в зрительной системе. Например, в слуховой системе тоже есть экраны. Но там они находятся не на периферии, как сетчатка; эти экраны — поля нейронов, находящиеся, например, в слуховых зонах коры больших полушарий: в одном направлении вдоль коры активность нейронов меняется в зависимости от громкости звука, а в другом — в зависимости от его частоты. Если на сеть падают два звука разной громкости и частоты, то латеральное торможение помогает воспринять их именно как два звука, а не как звук промежуточной громкости и частоты.

Сети с латеральными связями могут использоваться и в других целях, например в измерении расстояния между двумя точками. Пусть на линейную сеть, подобную той, что изображена на рис. 34, но с протяженными тормозными связями, проецируются две точки, разделенные расстоянием  $l$ . Все выходы сети поданы на нейрон-сумматор. Ясно, что чем ближе расположены две входные точки друг от друга, тем сильнее они взаимно затормаживаются и тем меньше выходной сигнал сумматора. Следовательно, этот сигнал зависит от расстояния — чем меньше  $l$ , тем меньше сигнал; чем больше  $l$ , тем больше сигнал.

3.24. По какому закону должен уменьшаться в зависимости от расстояния коэффициент торможения, чтобы выход нейрона-сумматора был прямо пропорционален расстоянию между точками?

Мы рассмотрели некоторые нейронные сети, которые могут участвовать в работе афферентных систем и играть роль детекторов. Рассмотрим теперь работу моторных сетей, включаемых командными нейронами.

### Моторные сети

Мы начнем с описания одной реальной сети, которая обнаружена у медицинской пиявки (рис. 38) и обслуживает плавание этого животного. При плавании пиявки в каждом сегменте ее тела возникают поочередные сокращения то спинных,

то брюшных мышц. Это вызывает волнообразное изгибание тела пиявки. Мы рассмотрим устройство генератора, который обеспечивает поочередное возбуждение то брюшных, то спинных мышц.

Схема генератора изображена на рис. 39, а.

Как видно, эта сеть образована четырьмя тормозными нейронами, соединенными между собой. Эта схема совершенно симметрична: все нейроны тормозные, и сама по себе эта сеть не включается, все нейроны молчат.

Командный нейрон дает возбуждающие синапсы на всех нейронах этой сети. Когда командный нейрон включается, то по чисто случайным причинам какой-то из четырех нейронов начинает возбуждаться первым. Пусть это будет, например, нейрон № 1. Как только он возбуждётся, он сильно затормозит нейроны № 3 и 4, и они будут продолжать «молчать». Нейрон № 2 никак не тормозится, и под действием сигнала от командного нейрона он возбуждётся вслед за нейроном № 1. Когда это произойдет, затормозятся нейроны № 1 и 4. Теперь нейрон № 3 никак не тормозится, и через некоторое время он заработает, затормозив нейроны № 1 и 2. Таким образом нейроны № 1—4 будут поочередно возбуждаться (схема их работы изображена на рис. 39, б).

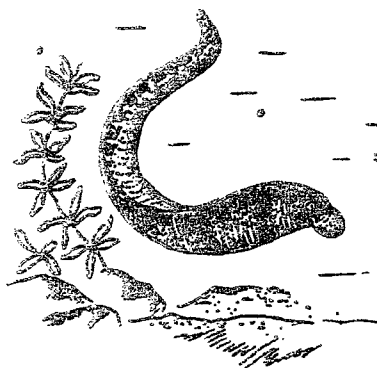


Рис. 38. Медицинская пиявка

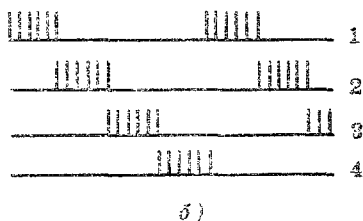
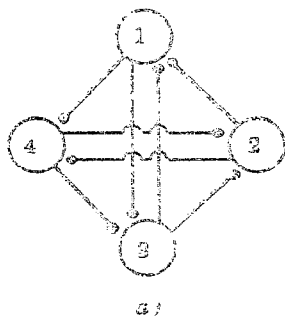


Рис. 39. Тормозное кольцо из четырех нейронов:

а — генератор плавания медицинской пиявки, б — схема, показывающая поочередность возникновения импульсов в нейронах кольца

Тут возникает одна проблема. Вось нейроны такого кольца — тормозные, а нужно возбуждать мышцы. Как же из тормозного сигнала получить возбуждающий? Эта проблема называется *проблемой инверсии*. Возникший тормозной нейрон тоже можно рассматривать как инвертор, т. е. как устройство, меняющее знак числа; в данном случае «минус» — возбуждение на «минусе» — торможение. А как изменить «минус» на «плюс»?

3.25. Придумайте нейронную сеть-инвертор, которая преобразует отрицательный (тормозной) сигнал в равный ему положительный.

3.26 а. Можно ли построить генератор, аналогичный генератору, изображенному на рис. 39, из другого числа нейронов: из двух? из трех? из пяти?

3.26 б. Что изменится в работе генератора плавления пиявки, если возбуждение, приходящее от командного нейрона, усилится?

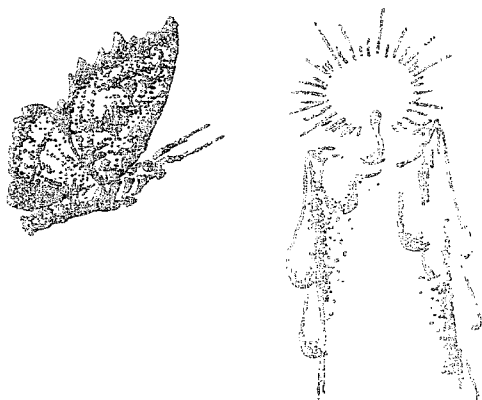


Рис. 40. Бабочка, летящая на свет

Интересно, что первоначально такая нейронная сеть — «тормозное кольцо» — была придумана члсто теоретически советским ученым В. И. Дукиним-Барковским (в то время студентом Московского физико-технического института), а лет через десять обнаружена у пиявки.

3.27. Известно, что мотылёк летит на свет (рис. 40). Придумайте нейронную сеть, имитирующую такое поведение, используя следующее: если свет, попадающий на правый и на левый глаз, имеет одну и ту же интенсивность, то мотылёк летит по прямой; если интенсивность различна, то это приводит к повороту мотылёка по направлению к свету.

3.28. Задайте определенную зависимость между разностью интенсивностей света (она зависит от угла, под которым мотылёк повернут от источника), попадаю-

щего на оканчивающего, и углы поворота мотылька за единичную единицу движения. По какой кривой мотылек будет двигаться к источнику света?

3.29. Вернемся теперь к задаче, в описании которой открывалось жеманство раздела на с. 14 этого пособия, — про бабочку крапиволицу, греющуюся на солнце. При ее решении предполагалось, что нейронные эффы обладают ступенчатыми характеристиками: или темнота, или солнце. На самом деле освещенность меняется непрерывно, и рецептор света будет выдавать непрерывно меняющийся сигнал.

Надо ли как-нибудь изменить схему рис. 6, если нейроны со ступенчатой характеристикой заменить на нейроны с линейной характеристикой? Если нет, то объясните, почему; если да, то как именно?

3.30 — 3.35. Ответьте на тот же вопрос, что и в задаче 3.29, для схем задач 2.8, 2.11, 2.19, 2.23, 2.24, 2.25.

Вернемся к схемам для детекторов. До сих пор мы считали, что сигналы действуют на нейроны длительное время или не касались вопроса о времени их действия. Между тем в реальности фактор времени играет часто весьма важную роль. В качестве введения в эту проблему рассмотрите задачу 3.36.

3.36. Придумайте нейронную сеть, в которой выходной нейрон реагировал бы на движение светлого пятна на сетчатке скрава палево. Как надо изменить зашу сеть при разных скоростях движения пятна?

Надо принять, что на передачу сигнала от одного нейрона к другому затрачивается определенный промежуток времени. Точно так же проходит некоторое время, пока светлое пятно переместится от одного фоторецептора к последующему.

Предложим еще одну интересную задачу.

Известно, что в ответ на неожиданный звук животное поворачивает глаза в направлении источника этого звука. Имеются специальные командные нейроны, управляющие поворотом глаз. Есть командный нейрон, который оставляет глаза в покое (на рис. 41 этот нейрон обозначен 0°), есть нейрон, вызывающий поворот глаз на 10°, на 20° и т. д. относительно того положения, в котором находится глаз.

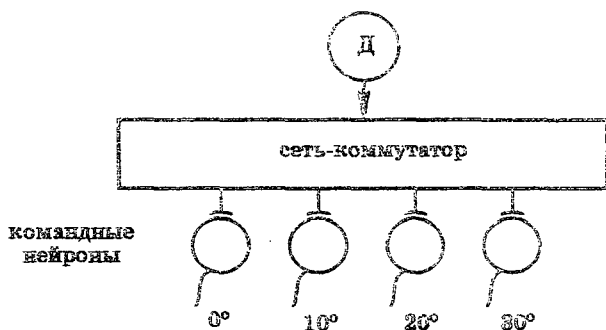


Рис. 41. К задаче о нейронной сети, управляющей поворотом глаз

Пусть источник звука находится прямо перед животным. Тогда в слуховой системе возбуждается детектор, который показывает соответствующее положение источника звука (на рисунке это нейрон Д). Имеется также нейронная сеть со следующими свойствами. Если глаза смотрят прямо вперед, то сеть подключает нейрон-детектор к командному нейрону  $0^\circ$ , так как поворачивать глаза не требуется. Если глаза повернуты на  $10^\circ$  вправо, то тот же нейрон-детектор теперь вызывает возбуждение другого командного нейрона  $10^\circ$ , который вызывает поворот глаз на  $10^\circ$  влево. Если глаза повернуты на  $20^\circ$  вправо, то тот же нейрон-детектор вызывает возбуждение командного нейрона  $20^\circ$  и т. д. Таким образом, нейрон-детектор оказывается «подключенным» к тому или иному командному нейрону в зависимости от угла поворота глаз. Такие нейронные сети называют *сетями-коммутаторами*.

### 3.38. Придумайте сеть-коммутатор для управления поворотом глаз в направлении источника звука.

В отличие от технических коммутаторов, в которых контакты часто отключаются от одних клемм и присоединяются к другим в результате чисто механического процесса, в нейронной сети аксоны не могут мгновенно отсоединяться от одних нейронов-мишеней и прирастать к другим нейронам: коммутация должна осуществляться за счет устройства самой сети.

#### § 4. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ИЗ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙРОНОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПОТАКТОВОМ ВРЕМЕНИ

В третьем параграфе мы рассматривали нейроны, которые по своим свойствам были довольно сходны с реальными нейронами. Далее мы будем использовать так называемые *формальные нейроны*, свойства которых, напротив, сильно отличаются от свойств реальных нейронов. Зато они позволяют в достаточно простой форме промоделировать те свойства нервной системы, на которые мы до сих пор почти не обращали внимания. Эти свойства связаны с учетом *времени*.

Формальные нейроны обладают следующими свойствами:

1. При возбуждении любой нейрон отвечает импульсом единичной величины, который длится один такт времени. Время разбито на такты равной длины.

2. Если нейрон № 1 возбужден в первый такт времени и при этом возбуждает нейрон № 2, то нейрон № 2 возбуждается во второй такт. Иными словами, время передачи возбуждения от одного нейрона к другому длится всегда один такт времени.

Пример: если нейрон № 1 (рис. 42) возбуждается в такт 1, то нейрон № 2 — в такт 2, нейрон № 3 — в такт 3, затем нейрон № 1 — в такт 4 и т. д.

3. Порог формальных нейронов измеряется в целых числах и соответствует числу возбуждающих синапсов, активация которых необходима для возбуждения нейрона. Порог записывается в кружочке, обозначающем нейрон. Каждый возбуждающий синапс создает сигнал, равный  $+1$ , каждый тормозной синапс — сигнал, равный  $-1$ .

4. Нейрон суммирует сигналы, приходящие в один и тот же такт времени.

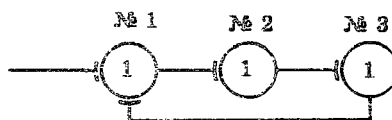


Рис. 42

4.1. Пусть сеть, изображенная на рис. 5 (см. с. 16), образована формальными нейронами.

а) Температура ниже  $46^{\circ}$ , в первый такт времени появилось солнце. Как будет работать эта сеть? Будет ли ее работа удовлетворительной? Как следует усовершенствовать сеть? Через сколько тактов после появления солнца бабочка раскроет крылья в результате работы усовершенствованной сети?

б) Светит солнце; в первый такт времени температура превысила  $36^{\circ}$ . Как будет работать сеть на рис. 6? Будет ли ее работа удовлетворительной? Как следует усовершенствовать сеть? Через сколько тактов после достижения  $36^{\circ}$  бабочка сложит крылья в результате работы такой усовершенствованной сети?

4.2. Как надо усовершенствовать сеть, изображенную на рис. 7 (см. с. 17), если она образована формальными нейронами? Через сколько тактов после появления солнца бабочка раскроет крылья в результате работы такой усовершенствованной сети?

4.3. — 4.7. Придумайте сети из формальных нейронов для задач 2.3, 2.4, 2.5, 2.9.

4.8. Личинка стрекозы, живущая в воде, передвигается реактивно: набирает воду в кишку через анус и затем с силой выбрасывает ее обратно, получая реактивный толчок и таким образом передвигаясь вперед. Можно представить работу личинки как работу четырехтактного двигателя. Такт 1: анус открыт, мышцы, сжимающие кишку, расслаблены, вода свободно втекает в кишку. Такт 2: анус закрывается. Такт 3: анус закрыт, мышцы кишки напрягаются и сжимают кишку. Такт 4: анус открывается, сжимающие кишку мышцы по-прежнему напряжены. Под давлением этих мышц вода с силой выбрасывается из кишки через анус, личинка движется в противоположном направлении.

Придумайте нейронную сеть, обеспечивающую работу этой системы.

4.9. Конструкторы сделали робота, который перемещается с помощью ног. Каждая нога имеет шаровой шарнир и согнутое колено (рис. 48). Имеются



температуры моторов, которые могут двигать ногу вперед, назад, вверх, вниз. (Вместо робота можно рассмотреть ногу животного, и тогда вместо моторов надо будет нарисовать четыре мышцы.)

Кодьба этого робота организована так:

а) работает моторы «вниз» и «назад»; при этом нога прижимается к грунту и отталкивается от него;

б) подтягивает ногу вверх;

в) продолжается подтягивание вверх и передняя нога в воздухе вперед;

г) нога опускается вниз на грунт. После этого совершается переход к фазе а), и цикл повторяется.

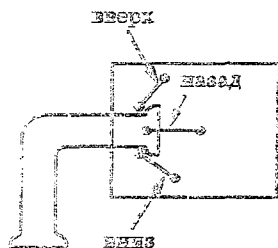


Рис. 48. Нога робота

Придумайте сеть из формальных нейронов для управления кодьбой такого робота. Сеть для управления кодьбой робота должна управляться кнопками «пуск» и «стоп».

4.9а. Как сделать, чтобы сигнал «пуск» не мог запустить в сеть новый импульс, который сбьет работу системы, если в сети уже имеется хотя бы один импульс?

4.9б. Сигнал «стоп» должен действовать только в том случае, если нога стоит на земле. Придумайте соответствующую нейронную схему. (Задачи 4.9а и 4.9б заимствованы из книги М. Арбиба «Метафорический мозг».)

4.10. Некоторое базовое поведение при питании поступает так: «вкусные» пищевые частицы, попавшие в кишечную полость, ест, а «невкусные» — «выплевывает». В кишечной полости у него есть два типа рецепторов: одни из них реагируют на горькое и очень кислое (кисельдобное). Как только среди пищевых частиц попадает хотя бы одна такая, эти рецепторы посылают «сигнал тревоги»: понало что-то ядовитое, одоровью особи угрожает опасности! Животное начинает активно сокращаться и растягиваться, промывая свою кишечную полость от яда, пока

рецепторы не перестанут подавать тревожный сигнал. Если пища соленая или сладкая, об этом узнают рецепторы второго типа. Они подают команду кишечным клеткам, и те выделяют в полость пищеварительные ферменты. Но если среди «сладкой» пищи попала хотя бы одна «горькая» частица, то выделение пищеварительных соков прекращается.

Итак, есть два вида рецепторов и три типа эффекторов: пищеварительные клетки; клетки, сжимающие кишечную полость; клетки, растягивающие кишечную полость. Надо придумать нейронную сеть, обеспечивающую такое поведение животного (обратите внимание на то, что при постольном действии «горькой» пищи два последних эффектора должны работать поочередно!).

- 4.10a. Усложните придуманную вами схему для задачи 4.10 так, чтобы полость тела на протяжении трех тактов времени сжималась и на протяжении трех тактов времени растягивалась.

4.11. Задача про тепловую иллюзию.

Известно, что при раздражении холодовых рецепторов человека может возникать иллюзия. Если к рецептору прикоснуться на короткое время холодным предметом (будем считать, что всего на один такт времени), а затем убрать этот предмет, то возникает ощущение тепла. Если коснуться того же рецептора холодным предметом и не убирать его, а держать более длительное время, то возникает ощущение холода без ощущения тепла вначале. Придумайте нейронную сеть, объясняющую возможный механизм такой иллюзии. (Эта задача заимствована из известной статьи Мак-Каллока и Питса 1943 г., о которой будет рассказано ниже.)

- 4.12. Придумайте сеть, которая будет давать тепловую иллюзию при действии холодного предмета на рецептор в течение не одного, а двух тактов времени (а затем для случая длительности действия в три такта, в  $n$  тактов).

В § 3 мы рассматривали в основном рецепторные системы (детекторы), в § 4 мы рассмотрели главным образом нейронные сети для управления какими-либо движениями, но задача проиллюстрирует, что сети из формальных нейронов могут быть полезны для понимания работы и сенсорной системы.

4.13. Слуховая система может определять направление на источник звука, измеряя время запаздывания прихода звукового сигнала к левому и правому уху. Придумайте сеть, которая работала бы, используя этот принцип, и содержала на выходе три детектора: «источник звука находится прямо передо мной», «источник звука находится слева», «источник звука находится справа».

Решая задачи этого параграфа, вы, вероятно, обратили внимание на то, что иногда приходится вставлять в сеть один или несколько лишних нейронов, необходимых для того, чтобы согласовать совпадение сигналов по времени. Такие цепочки нейронов, используемые для задержки сигналов на то или иное число тактов времени, называют *линиями задержки*. Допустим, что надо задержать сигнал на сто тактов времени. Ясно, что это можно сделать, поставив друг за другом в виде линейной цепочки сто нейронов. Но такой способ представляется слишком неэкономным. Нельзя ли израсходовать на эту задачу меньше нейронов?

4.14. Придумайте линию задержки на сто тактов времени, используя для этой цели менее ста нейронов.

Одно из возможных решений этой задачи приведено на рис. 44.

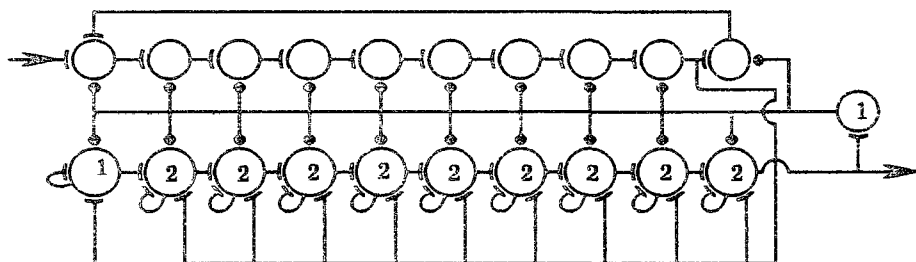


Рис. 44. Нейронный счетчик тактов

Фактически на этом рисунке приведена схема своеобразного «счетчика», где нейроны в верхнем ряду считают единицы, а в нижнем ряду — десятки. На выходе добавлен тормозной нейрон, который после ста тактов возвращает всю систему в исходное положение и делает ее вновь готовой к работе.

Такая система работает как своеобразные «часы» или, скорее, как секундомер. Возбуждение первого нейрона играет роль кнопки «пуск», а тормозной нейрон играет роль кнопки «стоп», которая в секундомере возвращает стрелки в исходное положение.

На очной сессии Биологического отделения ВЗМШ школьница из Воркуты Наташа Цветкова предложила оригинальную идею решения задачи 4.14.

Запустим одновременно импульсы в два кольца, имеющих длину в 9 и 11 нейронов. Конец каждого кольца действует на выходной нейрон с порогом 2. Этот выходной нейрон возбудится только после того, как пройдет 99 тактов — 11 циклов в кольце из 9 нейронов и 9 циклов в кольце из 11 нейронов. Мы получим выход ровно на сотом такте, использовав в сети всего 21 нейрон. Эту идею легко обобщить: можно использовать сети из трех и более колец, помещая на выходе нейроны с порогом 3 и выше.

Интересно исследовать возможности таких систем, использующих для получения больших интервалов времени кольца с взаимно простым числом нейронов; например, нельзя ли с их помощью получить более экономные сети, чем в случае «счетчиков»?

В схеме счетчика на рис. 44 пришлось использовать 21 нейрон, чтобы сделать линию задержки на 100 тактов времени.

- 4.15. Можно ли, используя те же идеи, что и в схеме рис. 44, построить счетчик меньше, чем из 21 нейрона?
- 4.16. Какое минимальное число нейронов вам потребуется, чтобы создать часы на 1000 тактов? на миллион тактов?

Может ли число нейронов для часов на 1000 тактов быть меньше 25?

- 4.17. Придумайте счетчик, который выдает сигнал на выходной нейрон на 821-м такте, начиная с момента запуска.

В задачах 4.15 — 4.17 речь шла о счетчиках тактов, т. е. о часах. Приходит первый пусковой импульс, и далее часы сами ведут счет тактов. Попробуйте теперь придумать не счетчик тактов, а счетчик импульсов.

- 4.18. Придумайте нейронную сеть — счетчик входных импульсов. Возбужденные нейроны этой сети должны показывать, сколько всего входных импульсов поступило на вход сети, или выходной нейрон должен возбуждаться после того, как на вход поступило, например, 12 импульсов. Входные импульсы не обязательно должны поступать во все последовательные такты времени (например, пятый импульс может прийти через три такта после четвертого).

Счетчики импульсов широко распространены в электронной промышленности. Например, такие счетчики измеряют уровни радиоактивности, подсчитывая число частиц, попадающих на вход счетчика. Вместо нейронов в таких устройствах используются технические элементы. При этом важно, что как у нейронов есть два состояния: «возбуждение» и «покой», так и у соответствующих элементов электронных схем есть два состояния.

Эта черта формальных нейронов роднит их также с электронными вычислительными машинами. В таких машинах имеются элементы, которые тоже могут находиться только в двух состояниях, которые обычно обозначают как «единица» (возбуждение) и «ноль» (покой). Отсюда возникает гипотеза, что нейронные сети из формальных нейронов могут производить такие же операции, как вычислительные машины.

- 4.19. Придумайте нейронную сеть, которая складывала бы два числа, заданные в двоичной системе.

4.20. Придумайте нейронную сеть, которая вычитала бы два числа, заданные в двоичной системе.

4.21. Один человек держит ладони, направленные друг к другу, на расстоянии примерно в 20 см. Другой помещает руку между ладонями. Если второй игрок касается сначала верхней ладони, а затем через короткое время (не больше чем за 5 с) — нижней, то первый игрок должен ловить его руку, сдвигая ладони; во всех остальных случаях прикосновения (например, только прикосновение к нижней ладони) — не должен. Придумайте нейронную сеть, которая обеспечивала бы поведение первого игрока в этой игре.

Формальные нейроны были введены в науку в знаменитой работе Мак-Каллока и Питтса в 1943 г. Эти американские ученые вели исследования в области теории автоматов и в области биологии. (Например, они участвовали в работе, в которой впервые были открыты детекторы в сетчатке лягушки.)

В математической логике существует специальный раздел, который называют алгеброй логики или логикой суждений. Те или иные утверждения записываются в виде формул; имеется несколько операций, которые связывают разные утверждения между собой; есть определенные правила преобразования формул, которые позволяют установить, какие утверждения являются верными, если известно, какие исходные утверждения истинны.

Показано, что для использования алгебры логики достаточно иметь некоторый набор основных операций. Одним из таких достаточных наборов являются операции: «И», «ИЛИ», «НЕ». Операция «И» используется в таких суждениях: если имеет место А и имеет место В, то имеет место и С. Операция «ИЛИ» означает, что С имеет место, если имеет место или А, или В, т. е. достаточно одного из них. (В алгебре логики может быть использован и другой набор базовых операций.)

Мак-Каллок и Питтс обратили внимание на то, что формальные нейроны могут легко осуществлять базовые операции алгебры логики.

Давайте рассмотрим схемы на рис. 45. На этом рисунке (позиция а) изображена схема элемента, осуществляющего

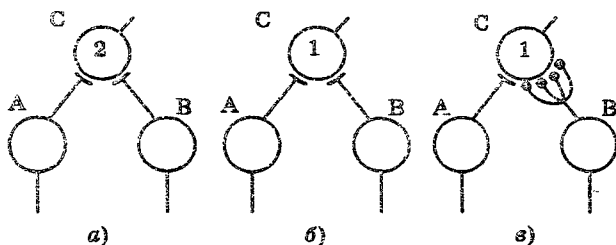


Рис. 45. Нейронные схемы для базовых операций

операцию «И». Это нейрон с порогом 2, на который действуют два входных нейрона, каждый из которых дает на выходном нейроне по одному синапсу. Событие, состоящее в том, что нейрон А возбуждается в момент  $t$ , мы будем обозначать так:  $A(t)$ . Возбуждение нейрона В в момент  $t$ :  $B(t)$ . Операцию «И» мы будем обозначать точкой (как знак умножения). Тогда схему на рис. 45 описывает формула  $A(t) \cdot B(t) = C(t + 1)$ , которая читается так: если в момент  $t$  возбужден нейрон А и в тот же момент времени  $t$  возбужден нейрон В, то в следующий момент (такт) времени будет возбуждаться нейрон С.

На рис. 45,б изображен элемент «ИЛИ». Здесь выходной нейрон С имеет порог 1; на него снова действуют два входных нейрона А и В. Операцию «ИЛИ» мы будем обозначать значком  $\vee$ . Схема рис. 45,б описывается формулой  $A(t) \vee B(t) = C(t + 1)$ , которая читается так: если в такт времени  $t$  возбужден нейрон А или нейрон В, то в следующий такт времени времени возбуждятся нейрон С.

Наконец, операция «НЕ» (см. рис. 45,в) реализуется тормозным нейроном, который дает синаптические окончания на выходном нейроне С и надежно тормозит его при любых входных сигналах. Операция «НЕ» обозначается чертой вверх над соответствующим символом. Схема на рис. 45,в описывается следующей формулой:  $A(t) \cdot \overline{B(t)} = C(t + 1)$ , которая читается так: если в момент времени  $t$  возбужден нейрон А и в тот же момент времени не возбужден нейрон В, то в следующий такт времени будет возбужден нейрон С.

4.22. Напишите формулы для нейронных схем, изображенных на рис. 46, как комбинации из операций «И», «ИЛИ», «НЕ».

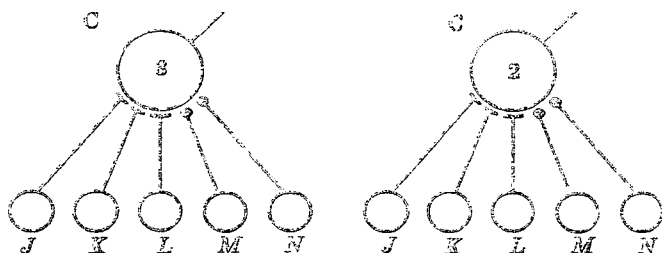


Рис. 46. Нейронные схемы к задаче 4.22

Входными нейронами для логических сетей могут быть рецепторы или же нейроны-детекторы. Логические формулы в обобщенном виде описывают, в частности, те же ситуации, которые мы раньше описывали более конкретными терминами. Например, мы раньше считали, что если светит солнце и температура ниже  $36^\circ$ , то бабочка крапивница раскрывает крылья или если рецепторы бабочки восприняли вкус сахара и бабочка голодна, то она распрямляет кобток и начинает питаться. С точки зрения логики эти ситуации совпадают: они состоят в том, что если есть условие А и условие В, то должно наступить действие С, а поэтому в данном случае надо использовать элемент «И». Так же как для математики совершенно безразлично, о каких именно пяти предметах идет речь или какое конкретное событие описывает квадратное уравнение, так и для математической логики несущественно конкретное содержание условий или действий, которые должны совершаться при тех или иных условиях.

Мак-Каллок и Питтс доказали, что любой логической формуле соответствует некоторая нейронная сеть и, наоборот, любая нейронная сеть может быть описана логической формулой.

Очевидно, что лисбые схемы, которые начинаются детекторами и кончаются командными нейронами, где выход обусловлен сочетанием возбуждения определенных входов, могут быть построены так, что задержка между входом и выходом не превышает двух тактов (при этом на одном нейроне может оказаться много синапсов). Доказано, что такие же схемы можно построить из большего числа нейронов, порог которых не превышает двух, причем на каждом нейроне имеется не более двух синапсов.



Мак-Каллок и Питтс предложили способы, позволяющие по заданной логической формуле построить соответствующую нейронную сеть. При этом для одной и той же формулы могут получиться разные нейронные сети (в результате тождественных преобразований меняется вид логической формулы и ей соответствует другая сеть, которая выполняет те же самые функции).

Вы видите, что теория нейронных сетей, с одной стороны, соприкасается с проблемами построения вычислительных машин, а с другой — с задачами математической логики. Поскольку наше пособие написано для биологов, мы ограничимся вышесказанным, хотя для школьников, интересующихся математикой, здесь открывается интересная возможность для чтения специальной литературы, решения задач и другой самостоятельной работы.

## § 5. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ С ПАМЯТЬЮ. ОБУЧЕНИЕ

В этом параграфе мы рассмотрим разные модели и задачи, связанные с обучением. Но прежде чем перейти к этим вопросам, хотелось бы еще раз напомнить, что мы рассматриваем в этом пособии в основном весьма упрощенные модели работы нервной системы. В особенно большой степени это относится к сетям с памятью. К сожалению, мы все еще довольно мало знаем о том, как работают системы памяти живых организмов, как в них записывается и считывается информация, как она организована в памяти и т. д. Таким образом, в этом параграфе мы будем рассматривать разные варианты сетей, которые говорят лишь о том, как могли бы в принципе работать нейронные сети с памятью. Однако анализ таких сетей не является бессмысленным. Во-первых, как уже отмечалось, иногда удается придумать и угадать такие устройства, которые реально существуют в живых организмах (имеется в виду «тормозное кольцо» — генератор плавания пиявки); наличие теоретических догадок помогает узнать такие устройства при экспериментальном изучении реальных объектов. Во-вторых, теоретические разработки позволяют биологам придумывать новые опыты и, наконец, в-третьих, если даже наши модели ошибочны, они снимают с процессов обучения покров таинственности, показывают, что оно может осуществляться на таких системах, принципы работы которых вполне доступны пониманию.

Прежде всего нам надо придумать «нейрон памяти», т. е. такой элемент, который может что-то запоминать. Мы выберем в качестве такого элемента нейрон с возвратной коллатералью, который возбуждает сам себя и после пришедшего импульса начинает непрерывно работать (коллатераль — это веточка аксона, а «возвратная» она потому, что возвращается назад и образует синапс на том самом нейроне, от чьего аксона она отходит). Тем самым его состояние после однократного воз-

буждения меняется: он все время «помнит», что к нему приходил возбуждающий сигнал (рис. 47). Чтобы такой нейрон «забыл» про приходивший сигнал, его надо затормозить.

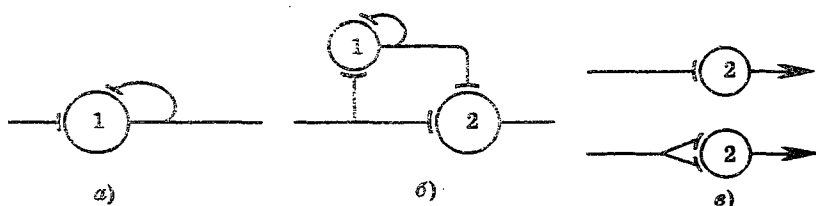


Рис. 47. Нейрон с памятью (а); простейшая запоминающая схема, использующая нейрон с возвратной коллатералью (б). Запоминающая схема (б) формально эквивалентна образованию нового синапса (в)

Фактически мы уже пользовались таким активным элементом памяти. Например, при построении счетчиков тактов (см. рис. 44) мы использовали такие нейроны, которые запоминали, что первый десяток тактов уже пересчитан и надо переходить ко второму. Рассмотрим теперь рис. 47, б. Когда сигнал по входному волокну приходит первый раз, он не вызывает возбуждение выходного нейрона (здесь использованы нейроны Мак-Каллока — Питтса, работающие по тактам времени). В первый раз сигнал приходит к выходному нейрону, но его порог равен двум, а входное волокно образует на нем всего один синапс. Однако этот первый сигнал вызывает возбуждение элемента памяти. От элемента памяти во второй такт придет сигнал к выходному нейрону, но опять активным будет только один синапс, и выходной нейрон не возбуждётся. Пусть теперь по входному волокну пришел новый импульс (элемент памяти уже работает). Теперь этот новый импульс вызовет возбуждение, т. е. к выходному нейрону в один и тот же такт придут два импульса: входной и от элемента памяти. Эту ситуацию можно формально описать так: сначала по входному волокну пришел импульс через один синапс (см. рис. 47, в сверху); он не возбудил выходной нейрон. Запоминание состояло в том, что у волокна «вырос» второй синапс (или вес синапса увеличился вдвое). Эта ситуация показана на рис. 47, в внизу. Таким образом, активация нашего нейрона с обратной связью (рис. 47, б) эквивалентна появлению нового синапса или увеличению веса синапса. В сетях с памятью часто используют

такие элементы, в которых имеются «модифицируемые» синапсы, т. е. синапсы, вес которых меняется в результате обучения. Мы видим, что «активный элемент памяти» и «модифицируемый синапс» вполне могут заменять друг друга. В дальнейшем мы будем иногда пользоваться и модифицируемыми синапсами.

### **«Обучение с первого раза», условные рефлексы, привыкание**

Известны случаи, когда в результате сильного эмоционального эффекта запоминание возникает с одного раза и запоминается надолго.

**5.1. Цыпленок и оса (рис. 48).** Известно, что цыпленок сразу после того, как выводится из яйца, начинает клевать разные предметы, в том числе мух и ос. Если оса ужалит цыпленка за язык, то он сразу запоминает это и при следующей встрече с осой убегает от нее.



Рис. 48. Цыпленок и оса

Придумайте нейронную сеть, которая описывала бы поведение цыпленка (у нее должно быть два входа — от детектора осы и болевых рецепторов и два выхода: командные нейроны пищевого поведения и бегства).

У ряда животных существует очень интересная форма обучения с первого раза, которая называется *импринтингом* (запечатлением). Например, птенцы после вылупления из яйца запоминают первый движущийся предмет, который попадает

ним на глаза (обычно это их мать), и начинают всюду следовать за ним.

Фактически схема, которую вы придумали, — схема простейшего условного рефлекса. Условный рефлекс состоит в том, что животное воспринимает последовательно два стимула: условный (в нашем случае это зрительный образ сосы), на который у животного нет никакой врожденной реакции, и безусловный (в нашем случае это болевое раздражение), на который у животного имеется определенная врожденная реакция (в нашей задаче это бегство).

Условный рефлекс состоит в том, что после нескольких повторов сочетания «условный стимул — безусловный стимул», при котором сначала подается «условный» стимул, у животного уже при предъявлении одного условного стимула возникает та реакция, которая ранее возникала только в ответ на «безусловный» стимул.

На самом деле наша задача 5.1 имеет несколько отличий от классического условного рефлекса. Эти отличия таковы: 1) «условный» стимул не является индифферентным, безразличным для животного; он вызывает пищевое поведение, так что у нас исходно было два «безусловных» стимула; 2) «условный» стимул должен подаваться за некоторое время до «безусловного», иначе условный рефлекс не вырабатывается. В нашей задаче мы считаем, что оба стимула действуют одновременно; 3) условный рефлекс вырабатывается обычно только после некоторого числа повторов; для некоторых животных достаточно десяти сочетаний «условного» и «безусловного» стимулов, а для других животных требуются сотни сочетаний.

5.2. Придумайте нейронную схему для «обучения с первого раза», которая будет работать лишь в том случае, если «безусловный» стимул запаздывает по отношению к «условному» на некоторое число (например, на 3—5) тактов.

5.3. У собаки вырабатывают условный рефлекс. Сначала перед ней зажигают лампу, а через 3—5с ей дают пищу. При появлении пищи у собаки выделяется слюна. После десяти сочетаний зажигания лампы и подачи пищи слюна у собаки начала выделяться в

ответ на зажигание одной лампы, т.е. у собаки выработался условный рефлекс.

Придумайте нейронную сеть для имитации такой выработки условного рефлекса.

Дальше мы расскажем вам про некоторые опыты, описанные в книге И. П. Павлова «Лекции о работе больших полушарий головного мозга», и предложим задачи на придумывание нейронных сетей, которые имитировали бы результаты этих экспериментов.

И. П. Павлов описывает выработку условного рефлекса на звонок. Сначала дается звонок, а потом перед собакой ставится пища. Через некоторое время у собаки вырабатывается условный рефлекс, который выражается в том, что уже только на звонок у нее выделяется слюна. Эффективность рефлекса измеряется числом капель выделившейся слюны. Затем ставится новый опыт: собаке показывают черный квадрат, через десять секунд дают звонок, но пища не ставится. Тем не менее через некоторое число таких сочетаний у собаки начинает выделяться слюна уже при показе черного квадрата. Такие условные рефлексы И. П. Павлов называл вторичными.

5.4. Придумайте нейронную сеть, объясняющую выработку вторичного условного рефлекса. Учтите, что при предъявлении черного квадрата слюны выделяется меньше, чем в ответ на звонок.

Опишем еще один опыт И. П. Павлова. Вырабатывается условный рефлекс следующим образом: дается звонок, потом предлагается пища; через 30 минут звонок, потом пища; еще через 30 минут звонок, за ним пища и т. д.

После выработки такого условного рефлекса наблюдается следующий результат. Если дать звонок через 10 минут после кормления, то слюны выделяется мало; если через 20 минут — то больше; если через 30 минут — то выделяется максимальное количество слюны.

5.5. Придумайте нейронную сеть, соответствующую описанному выше опыту.

Давайте теперь на некоторое время отвлечемся от книги И. П. Павлова и рассмотрим явление, которое называют *привыканием*.

Существует такое замечательное явление — ориентировочный рефлекс (И. П. Павлов называл его рефлексом «что такое?»). Он выражается в том, что в ответ на новый звук животное настораживается, приподнимает уши, поворачивает голову в сторону звука; если животное лежит, то может вскочить на ноги и т. д. Ориентировочный рефлекс возникает в ответ на появление нового предмета, изменение яркости света и другие изменения в окружающей среде. Ясно, что этот рефлекс играет важную роль в жизни животных и человека. Пусть теперь новый звук появляется неоднократно, через разные промежутки времени. На первое его предъявление животное отвечает эффективной ориентировочной реакцией, на второе — более слабой реакцией, на третье — еще более слабой. В конце концов, если за этим звуком не следует ничего важного для животного, оно вообще перестает на него реагировать. Говорят, что наступило привыкание. Это явление играет чрезвычайно важную роль. Если бы его не было, жизнь человека стала бы просто невозможной. Мы все время выдавали бы сильную ориентировочную реакцию на обычные предметы обихода (мебель, книги), на знакомых людей и т. д. и не могли бы заниматься другой деятельностью.

Давайте попробуем придумать систему, которая моделировала бы привыкание. Для этого нам потребуются следующие сведения.

1. Повторение раздражения приводит к снижению ответной реакции (обычно реакция убывает экспоненциально).

2. Через некоторое время после прекращения действия раздражителя (это может быть день или неделя) реакция самопроизвольно восстанавливается.

3. При изменении раздражителя возникает ориентировочный рефлекс (например, если многократно подавать достаточно громкий звук и дожидаться привыкания, а потом дать менее громкий звук, возникает ориентировочный рефлекс).

5.6. Какие «блоки» должны входить в систему, обеспечивающую привыкание? В чем функция каждого

из таких блоков? Какие нейронные сети могут осуществлять такие функции?

А теперь вернемся к книге И. П. Павлова. Там написано, что если мы перестанем подкреплять условный раздражитель (например, звук) безусловным (например, пищей), то через некоторое число повторений условный рефлекс угасает (например, перестает выделяться слюна в ответ на звук). После нескольких подкреплений пищей рефлекс восстанавливается. Угасание условного рефлекса — один из вариантов привыкания.

5.7. Как надо изменить схему, которую вы придумали к задаче 5.6, чтобы она объясняла восстановление условного рефлекса после нескольких подкреплений? Объедините схемы выработки условного рефлекса и схему привыкания.

А теперь рассмотрим еще один опыт из книги И. П. Павлова. У собаки вырабатывается условный рефлекс на звук определенной частоты (звук I). Если теперь подать звук несколько отличающейся частоты (звук II), то рефлекторная реакция возникает и на него. После этого звук I продолжают подкреплять пищей, а звук II не подкрепляют. Через некоторое время рефлекторная реакция возникает только на звук I, а на звук II животное отвечать перестает. Этот процесс называют выработкой дифференцировки (различения).

5.8a. Придумайте нейронную сеть, которая объясняла бы какой-то вариант дрессировки животных. Все ли случаи дрессировки полностью сводятся к выработке условных рефлексов?

5.8b. Придумайте нейронную сеть, которая позволила бы собаке Бетти научиться вести себя так, как описано в задаче 2.8.

5.9. Придумайте нейронную сеть для выработки дифференцировки.

Мы рассмотрели с вами «обучение с первого раза», куда входят импринтинг, условные рефлексы и привыкание («отрицательное обучение»). Теперь мы перейдем к другим системам обучения и другим задачам.



## Перцептроны и другие обучающиеся классификационные системы

В 1957 г. американский нейрофизиолог Ф. Розенблатт придумал машину, которую можно было научить отличать один объект от другого. Он назвал эту машину перцептроном (от слова «перцепция» — восприятие). С этой работы началось важное научное направление. Прежде чем рассказать о его особенностях, разберем, как устроен и как работает перцептрон.

За прошедшие с этого времени годы было придумано очень много разных конструкций, но мы разберем самый простой вариант.

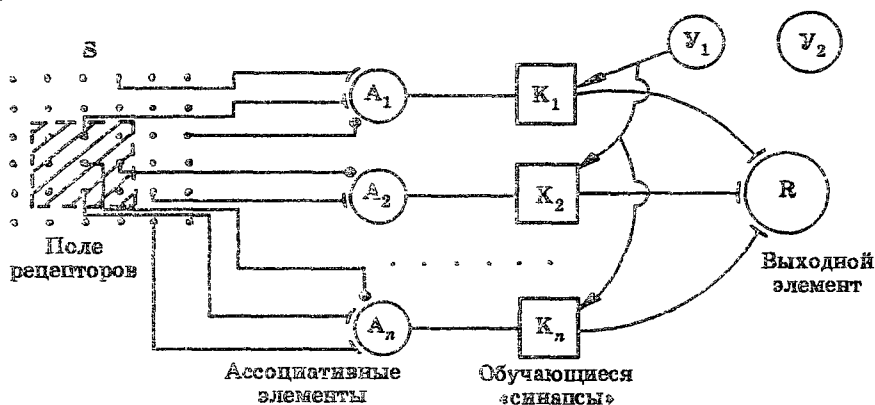


Рис. 49. Трехслойный перцептрон

Перцептрон (рис. 49) состоит из трех слоев элементов (нейронов). Элементы первого слоя называют S-элементами (от слова «сенсорные»); они играют роль рецепторов, а весь слой играет роль своеобразной элементарной сетчатки. Среди элементов первого слоя имеются как возбуждающие, так и тормозные нейроны.

Нейроны второго слоя называют A-элементами (от слова «ассоциативные»). На каждом A-элементе кончаются аксоны от некоторого числа S-элементов. Каждый S-элемент передает A-элементу сигнал, равный либо +1, либо -1 (если вход их тормозной). Если сумма всех этих сигналов больше порога A-элемента, то A-элемент возбуждается.

Аксоны от всех A-элементов кончаются на R-элементе (от слова «реакция», т. е. «ответ»). На нашем рисунке на пути

от А-элементов к R-элементу нарисованы квадратик, внутри которых стоит буква К. Их роль будет ясна из дальнейшего.

В схеме перцептрона есть неизменные части. Так, связь между S-элементами и А-элементами выбрана раз и навсегда и не меняется. Точно так же не меняются пороги А-элементов и R-элемента. Все изменение при обучении состоит в том, что меняется эффективность воздействия элементов А на элемент R, т. е. меняются «веса синапсов» в связях А- и R-элементов. Эти переменные веса синапсов и обозначены на рис. 49 как переменные коэффициенты  $K$  (напомним, что изменение веса синапса — это то же самое, что включение нового активного элемента памяти).

На рис. 49 на поле рецепторов «освещен» квадрат, содержащий девять элементов (квадрат заштрихован). Показаны некоторые связи от сенсорных к ассоциативным элементам. Видно, что к элементу  $A_1$  придет сигнал, равный +1, к элементу  $A_2$  — сигнал, равный -1, а к элементу  $A_n$  — сигнал, равный нулю.

Как же идет обучение этой системы? Прежде всего ответим на вопрос, чему именно ее учат. Перцептрон учат отличать друг от друга два класса объектов, например горизонтальные отрезки от вертикальных, или квадраты — от окружностей, или крестики — от ноликов.

Рассмотрим случай, когда перцептрон учат отличать горизонтальные отрезки от вертикальных. Как же осуществляется обучение?

Сначала (до обучения) все коэффициенты  $K$  равны нулю, т. е. А-элементы не могут влиять на R-элемент. Затем устройству «показывают» горизонтальный отрезок, который проецируется на какую-то часть поля рецепторов. При этом возбуждается какое-то количество А-элементов. Учитель при этом нажимает кнопку  $Y_1$ , связанную со всеми линиями передачи сигнала от А-элемента к R-элементу. Под действием этой кнопки у всех элементов, которые возбудились при показе горизонтальной линии, вес синапсов увеличивается на единицу. А у тех, которые не возбудились, вес синапсов не меняется. Затем устройству показывают вертикальную линию. При этом возбудятся какие-то новые А-элементы (а возможно, и часть тех, которые отвечали на горизонтальную линию). Теперь учитель нажимает кнопку  $Y_2$  (на рисунке ее связи не показаны,

чтобы не усложнять чертеж, но она тоже связана со всеми линиями, идущими от А-элементов к R-элементу). Под действием этой кнопки у всех А-элементов, возбуждившихся в ответ на показ вертикальной линии, вес синапсов уменьшается на единицу (а так как исходно он был равен нулю и только у некоторых мог стать равным единице при показе горизонтальной линии, то, скорее всего, суммарный сигнал от всех А-элементов, который будет действовать на выходной элемент, окажется отрицательным). Затем перцептрону показывают новую горизонтальную линию, новую вертикальную и т. д. Линии эти можно показывать в случайном порядке. После показа некоторого количества таких линий обучение можно считать состоявшимся, и тогда проводится «экзамен». Перцептрону показывают новую горизонтальную линию (точнее, отрезок некоторой длины). Если при этом R-элемент возбуждился, то ответ верен, если не возбуждился, то ответ ошибочен. Потом показывают отрезок вертикальной линии. Если R-элемент возбуждился, то ответ ошибочен, если не возбуждился, то верен. Если перцептрон дает мало верных ответов, то его надо доучивать. (Вместо одного R-элемента можно поставить два и сделать так, чтобы в первом из них ответ возникал при показе горизонтальной линии, когда сумма всех сигналов от А-элементов положительна, а во втором — когда она отрицательна.)

**5.10.** Придумайте такую нейронную сеть, чтобы она вела себя как обучаемая часть перцептрона, т.е. при нажатии кнопки  $Y_1$  увеличивала на единицу сигнал, приходящий от тех А-элементов, которые были возбуждены, а при нажатии кнопки  $Y_2$  уменьшала этот сигнал на единицу.

**5.11.** Придумайте нейронную сеть для перцептрона с двумя выходными R-элементами.

Может оказаться, что задача, предложенная перцептрону, слишком сложна для него и он не может ее решить (например, не научится отличать окружности от слегка вытянутых эллипсов). Такие задачи существуют. Но если задача разрешима, то после достаточно долгого обучения перцептрон научится ее решать. (Это утверждение является доказанной теоремой. Интересно, что теорема ничего не может сказать о том, какие

задачи являются разрешимыми и сколько времени потребуется потратить на обучение.)

А теперь остановимся на некоторых важных особенностях перцептрона. Ф. Розенблатт, придумавший перцептрон, особое внимание обращал на следующее. Связи между рецепторами и ассоциативными элементами могут быть выбраны абсолютно случайно. В ходе эмбрионального развития организма не надо заботиться, чтобы связи между нейронами установились вполне строгим образом. Даже при случайных связях в результате обучения перцептрон научится решать задачу узнавания. Розенблатт рассуждал так. Чтобы установить строго определенные связи между миллионами нейронов, требуется очень много информации, которая не может уместиться на молекулах ДНК. А перцептрон работает при случайных связях рецепторов и позволяет понять, как решается эта проблема с генетической информацией.

Далее. Нейронные сети, которые мы рассматривали раньше, работают безошибочно (а если в них испортился какой-то нейрон, то они, как правило, начинают работать совершенно неверно). Поведение перцептрона гораздо более сходно с поведением человека. Поломка того или иного отдельного нейрона несколько ухудшает результат, но не приводит к бессмысленным ответам. В ходе обучения перцептрон, как и человек, сначала часто ошибается, но, по мере того как он набирается опыта, число ошибок снижается.

В результате исследования перцептронов Розенблатт пришел к выводу, что они работают сходно с человеческим мозгом, и считал, что теория перцептронов — это часть теории, которая должна объяснить работу мозга. Ученые, работающие в этой области, разделились на две группы: на тех, кто хвалил перцептроны, и на тех, кто указывал на их ограниченность. Эта дискуссия не утихла и сейчас. Некоторые ученые считают, что перцептрон может решать только очень простые задачи. Другие в ответ говорят, что сложные задачи действительно непосильны для простейшего трехслойного перцептрона, но что они могут быть решены многослойными перцептронами. (Здесь есть даже и такая проблема: сколько слоев надо иметь перцептронку для решения задач данной сложности? Эта проблема имеет некоторое сходство с нашей задачей 4.15, где в действительности вопрос тоже состоит в том, сколько слоев

целесообразно выбрать для счетчика тактов, чтобы использовать минимальное число нейронов.) Перцептронам сейчас посвящено очень большое число публикаций.

На первый взгляд, довольно произвольным элементом конструкции перцептрона являются «кнопки»  $U_1$  и  $U_2$ . (Вообще такое обучение называют обучением с учителем и отличают его от самообучения.) Но, оказывается, в организме можно найти некоторый аналог этих кнопок. В мозгу млекопитающих были открыты так называемые «центр удовольствия» и «центр неудовольствия». Многие биологи рассматривают эти центры как универсальные «кнопки», указывающие на успешность того или иного действия или на его ошибочность во время обучения.

По примеру перцептрона были разработаны и другие обучающиеся нейронные сети (например, для запоминания разных слов, для обучения движениям и др.).

Давайте рассмотрим нейронную сеть для запоминания фраз, придуманную американским нейрофизиологом Бриндли. Эта сеть решала следующую задачу. Имеется словарь, состоящий из большого числа слов (у Бриндли из 10 000 слов). Из этого словаря составляются фразы из трех слов. Конечно, из 10 000 слов можно составить очень много троек слов, но большинство таких троек не будет иметь смысла. Бриндли считает, что можно составить примерно 100 000 фраз, имеющих смысл. На входы машины подаются фразы, имеющие смысл, и она запоминает их.

После обучения проводится экзамен. Он состоит в том, что на входы машины подаются два первых слова из фразы, а машина сама «произносит» на выходе третье слово фразы, которая ей ранее предъявлялась во время обучения (при обучении запрещается подавать фразы, у которых два первых слова одинаковые, а третьи — разные, например, АВС и АВД (скажем, «охотник убил зайца» и «охотник убил льва»)).

Устройство сети Бриндли показано на рис. 50. В этой сети есть три слоя нейронов. Первый слой — *детекторы входных слов*; каждому слову соответствует свой нейрон-детектор. Три запоминаемых слова подаются на эти детекторы в три последовательных такта времени. Аксоны нейронов-детекторов ветвятся каждый на три коллатерали, так что каждый сигнал идет по трем ветвям. В одной из них вставлена задержка на

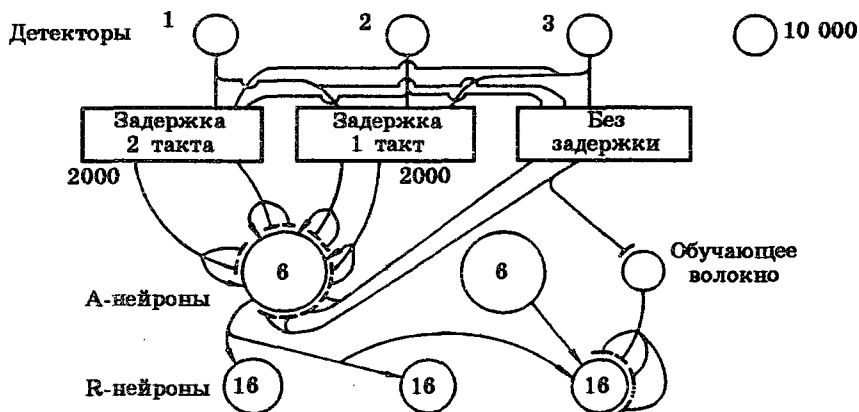


Рис. 50. Сеть Бриндли для запоминания фраз

два такта времени, во второй — задержка на один такт, а в третьей ветви задержки нет. Это сделано для того, чтобы после произнесения третьего слова все три сигнала попадали одновременно на нейроны второго слоя — *ассоциативные нейроны* (А-нейроны). Таких нейронов в схеме Бриндли было около 5000.

На каждом А-нейроне оканчивалось по 2000 волокон с задержкой в два такта, по 2000 волокон с задержкой в один такт и по 2000 волокон без задержки. Входы от разных нейронов-детекторов распределялись среди А-нейронов случайным образом. Волокна без задержки оканчиваются на А-нейронах двумя синапсами, а остальные волокна до обучения давали два синапса, после обучения — три. Порог А-нейронов был равен 6.

В третьем слое расположены *R-нейроны*. Их было 10 000. Каждый выходной нейрон соответствовал своему слову. Порог этих нейронов был равен 16. На каждый выходной нейрон действовали, во-первых, все А-нейроны и, во-вторых, специальное волокно, которое является ответвлением, идущим от линий без задержки нейронов-детекторов. Это специальное волокно работало только во время обучения и выключалось во время экзаменов. Оно давало больше 16 синапсов и всегда возбуждало R-нейрон. Напротив, волокна от А-нейронов давали всего по одному синапсу, причем до обучения эти синапсы были неэффективны, а после обучения их вес был равен еди-

нице. Таким образом, в отличие от перцептрона в схеме Бриндли обучающиеся синапсы имелись в двух слоях: и на А-нейронах, и на R-нейронах.

Посмотрим теперь, как идет процесс обучения. При поступлении на вход сети данной тройки слов возбуждятся все А-нейроны, на которые попали по три входных волокна (с задержками и без нее), так как эти волокна дают по два синапса каждый, а порог А-нейрона равен 6. От этого обучаемые синапсы (на рисунке они указаны стрелками) «проторятся», и теперь волокна с задержками в один и два такта будут давать уже по три синапса каждый. Когда во время экзамена мы подадим два первых слова, то опять возбуждятся все те же А-нейроны, которые раньше возбуждались только от трех слов.

Обратите внимание на то, что обучение синапсов тут совершенно отлично от всех ранее рассмотренных случаев. Действительно, при обучении с первого раза и при выработке условных рефлексов нам было важно для обучения совпадение во времени *входных сигналов*. Точно так же в перцептроне синапсы обучаются при совпадении возбуждения А-элемента и нажатия кнопки, т. е. тоже двух входных сигналов. Все обучение происходило *до возбуждения того нейрона, на котором оканчивались обучаемые синапсы*. А в схеме Бриндли синапс должен «обучиться» после того, как возбуждился тот нейрон, на котором оканчивается этот синапс. Третьи синапсы входных волокон должны стать активными после того, как возбуждятся А-элемент, на котором они оканчиваются.

**5.12. Придумайте сеть с элементом активной памяти, который обучался бы так же, как синапс в сети на рис. 50. Или, если быть более точным, эти синапсы обучаются, когда в предыдущий такт возбудилось их пресинаптическое волокно, а в последующий такт — тот нейрон, на котором они оканчиваются.**

Итак, в результате подачи трех слов возбудилось какое-то количество А-нейронов (например, 25). В следующий такт возбудился под действием обучающего волокна как раз тот выходной нейрон, который соответствует последнему слову тройки слов (к нему через один синапс придет сигнал от волокон, не имеющих линии задержки на пути к А-нейронам). Получится, что в момент возбуждения этого нейрона на нем

сработают (и обучатся) как раз синапсы от 25-ти А-нейронов. (Эти синапсы — их называют «синапсы Хебба» — обучаются, когда одновременно срабатывают и синапс и нейрон, на котором синапс оканчивается.) Во время экзамена возбудятся те же 25 нейронов и от их обученных синапсов — выходной R-нейрон, соответствующий третьему слову тройки.

Чем интересна схема Бриндли? Прежде всего тем, что она позволяет запомнить очень большую информацию (100 000 сочетаний), используя не слишком большое число нейронов.

Схема Бриндли может не справиться с задачей или допустить ошибку. Например, может найтись такая тройка слов, что от нее возбудится меньше 16 нейронов (это ниже порога R-нейронов). Ясно, что такую тройку схема выучить не сможет. Бриндли показал, что при выбранных им параметрах такой случай практически невероятен, если соединение входов с А-нейронами случайно. (Вообще, выбор конкретных чисел — это не произвол Бриндли; это параметры, которые обеспечивают хорошую работу схемы при словаре в 10 000 слов.)

Схема начинает ошибаться, если ее заставили выучить слишком много троек слов.

### 5.13. Разберите, как будет работать схема, если при обучении ее заставили выучить все возможные сочетания трех слов. Какие ошибки в ответах схемы будут при этом возникать?

Второе замечательное свойство сети Бриндли (кроме того, что она может запомнить много) — это ее надежность. Бриндли показал, что при гибели  $1/4$  всех А-нейронов сеть перестает узнавать из 100 000 выученных троек всего 200 фраз.

Такие схемы, как схема Бриндли, называют *моделями ассоциативной памяти*. Сейчас придумано очень много сетей такого рода.

### Случайные процессы. Забывание. Надежность

В перцептроне и в схеме Бриндли мы встретились с понятием случайного соединения нейронов. Для описания случайных явлений служит специальная математическая дисциплина — теория вероятностей. Именно эту теорию использовал Бриндли при расчете параметров своей схемы.



Случайные процессы могут встречаться в организмах не только при образовании нервных связей. Представьте себе бабочку, которая старается спастись от преследующей ее птицы. Если бы бабочка летела по прямой, то птица быстро ее догнала бы. Но даже если бабочка будет лететь зигзагами, то изменения направления полета будут подчиняться какой-то закономерности, птица может уловить эту закономерность и поймать добычу. Самое выгодное поведение бабочки — случайно менять направление полета. А для этого хорошо бы иметь в нервной системе устройство, которое обеспечивало бы такое поведение.

#### 5.14. Придумайте нейронную сеть, на выходе которой импульсы появлялись бы в случайные моменты времени.

Случайные процессы возникают в нервной системе не только тогда, когда они выгодны. Они возникают постоянно. Это связано со следующими реальными особенностями устройства нервной системы.

Мы до сих пор считали, что синапс выделяет медиатор (вещество, действующее на нейрон-мишень) только в том случае, если по аксону к синапсу приходит нервный импульс. Однако в действительности это не так. Время от времени из синаптического окончания медиатор выделяется самопроизвольно в случайные моменты времени. Так как на нейронах имеется много синапсов, то под действием случайного выделения медиатора нейрон может иногда возбудиться сам по себе (когда действие случайно выделившегося медиатора сдвинет потенциал выше порога). Таким образом, в нервных сетях из реальных нейронов могут возникать случайные импульсы.

Но даже если эти импульсы и не возникают, под действием ряда причин пороги нейронов все время меняются. Если случайно выделится некоторое количество тормозного медиатора из тормозных синапсов — порог нейрона повысится, если выделяется возбуждающий медиатор — порог понизится.

Выше мы уже говорили о надежности перцептрона и схемы Бриндли. Мы говорили, что при гибели части нейронов эти схемы не перестают выполнять свои функции, хотя и начинают работать хуже (как и реальный мозг при небольших повреждениях).

Возникает интересная проблема: разработать такие нейронные сети из нейронов того или иного типа, чтобы сами сети работали надежно даже в тех случаях, когда пороги нейронов не остаются постоянными. Разработана специальная теория построения надежных схем из элементов, каждый из которых может случайно менять свои параметры.

5.15. Вернитесь к задаче про бабочку крапивницу. Пусть у каждого нейрона порог может в случайные моменты времени становиться на единицу больше (вместо одного — два, вместо двух — три), а потом через несколько тактов может снова возвращаться к исходному значению. Придумайте такую схему, чтобы она работала как надо несмотря на эти изменения порогов.

Один из процессов, который, вероятно, связан со случайными явлениями в нервной системе, — это забывание. Забывание имеет свои закономерности. Например, если человека заставить выучить большее число бессмысленных слогов, то через некоторое время (например, через две недели) он забывает половину из них; еще через две недели он забывает половину того, что мог изложить при первой проверке, и т. д. Этот закон забывания был открыт немецким психологом Эббингаузом и носит его имя. Такое забывание описывается теми же формулами, что и процесс радиоактивного распада. Это позволяет думать, что забывание бессмысленных слогов тоже обусловлено случайными явлениями.

При моделировании обучения обычно стараются придумать модели памяти, но имеет смысл построить и модели забывания. Мы выбрали в качестве элемента памяти активный элемент. Как правило, на таком нейроне в разных схемах оканчивается тормозной нейрон, чтобы можно было «стирать» запись в памяти. Если такой тормозной нейрон может изредка самопроизвольно возбуждаться, то это будет приводить к случайному забыванию имеющегося в памяти материала (такая модель может, в частности, использоваться для описания затухания условных рефлексов).

До сих пор мы рассматривали с вами случайные процессы, которые возникают в самой нервной системе, т. е. внутри

организма. Но случайные явления часто возникают во внешней среде.

В заключение рассмотрим, как организм может обучаться правильному поведению в такой случайной среде. Теория такого обучения была придумана замечательным советским ученым М. Л. Цетлиным.

Мы будем разбирать эту теорию на конкретном примере. Пусть во внешней среде имеются осы и мухи, довольно похожие на ос. Рассмотрим поведение птицы, которая использует мух в пищу. У птицы есть две тактики поведения. Первая тактика состоит в том, что птица, увидев насекомое, сразу же клонет его. Птица при этом не разбирается, кто находится перед ней — оса или муха. Будем считать, что если перед птицей оказалась муха, то птица получает «поощрение», равное  $+1$ . Если же птица клонет осу, то она получает «штраф», равный  $-1$ . Вторая тактика поведения птицы состоит в том, что она сначала рассматривает добычу, чтобы отличить муху от осы (рис. 51). В этом случае насекомое успевает улететь от птицы (будем считать для простоты, что насекомое при этой тактике всегда успевает спастись). Если птица узнала осу и не успела ее клонуть, то она получает поощрение  $+1$ , а если птица узнала муху и упустила ее, она получает штраф  $-1$ .

Какое же поведение целесообразно выбрать птице? Очевидно, это зависит от соотношения ос и мух во внешней среде. Если мухи встречаются гораздо чаще, то выгоднее использовать

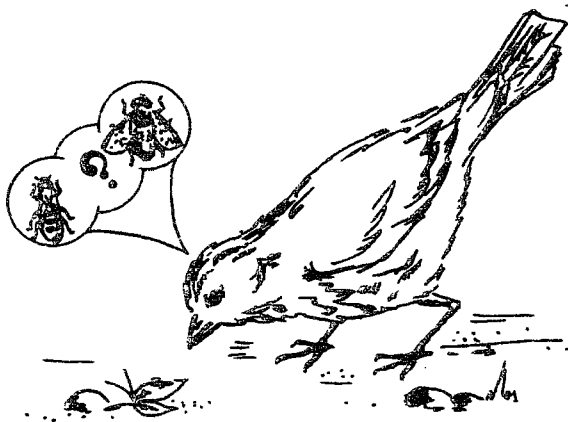


Рис. 51. Птица перед выбором: оса или муха?

первую тактику; если гораздо чаще встречаются осы, выгоднее вторая тактика. Но пусть в среде из каждых 10 насекомых 4 осы и 6 мух. Птице это соотношение заранее неизвестно. Встречаются ей мухи и осы в случайном порядке. Посмотрим, как может быть устроена система для обучения правильному поведению.

Сначала мы рассмотрим конструкцию, которая называется автоматом с линейной тактикой или автоматом Цетлина. Принцип его работы иллюстрирует рис. 52.

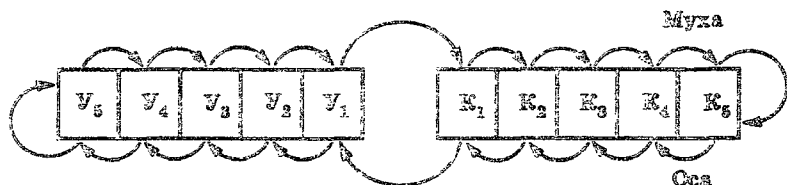


Рис. 52. Автомат Цетлина (автомат с линейной тактикой)

Автомат имеет две ветви памяти: для первой тактики поведения (назовем ее  $K$  — от слова «клевание») и для второй тактики поведения (назовем ее  $U$  — от слова «узнавание»). Каждая ветвь имеет некоторое число ячеек памяти. На нашем рисунке для определенности выбрано по 5 ячеек памяти: это число ячеек будем называть глубиной памяти. Если активна какая-то ячейка памяти  $K$ , птица клюнет увиденное насекомое, если «горит» любая ячейка  $U$ , птица не клюнет насекомое, а опознает его.

Правила работы автомата очень просты. Пусть автомат находится в состоянии  $K_1$  и попалась муха, тогда автомат переходит в состояние  $K_2$ ; если в следующий раз тоже попалась муха, он переходит в состояние  $K_3$  и т. д. Если автомат пришел в состояние  $K_5$  и попалась муха, то автомат остается в этом состоянии. Если автомат находится в состоянии  $U_3$  и попалась муха, то он переходит в состояние  $U_2$  и т. д. Если он находился в состоянии  $U_1$ , то переходит в состояние  $K_1$ . Эти переходы показаны стрелками в верхней части рисунка. Переходы, которые возникают при встрече с осой, показаны стрелками в нижней части рисунка.

Это правило поведения можно сформулировать так: если автомат совершает то действие, за которое его поощряют, то он повторяет то же действие и «уходит» в глубину памяти;

если автомат совершает действие, за которое его штрафуют, то он двигается в таком направлении, что это приводит к смене действия.

Можно доказать, что такой автомат будет вести себя целесообразно. Если в среде много мух, то автомат в основном будет находиться в состоянии  $K_5$  и будет все время ловить добычу; лишь в том случае, если ему случайно встретятся пять ос подряд, он на небольшое время перейдет к опознаванию насекомых, но после того, как снова встретятся мухи, он «успокоится» и вернется к наиболее выгодной тактике. Напротив, если в среде будет много ос, автомат будет в основном находиться в состоянии  $Y_5$ .

Тут возникает интересный вопрос: какую глубину памяти целесообразно иметь такому автомату? Представим себе, что глубина памяти будет равна всего одной ячейке.

**5.16.** В среде имеется 60% мух и 40% ос. У автомата всего одна ячейка памяти. Какой средний доход будет иметь такой автомат?

*Пояснение.* Пусть автомат все время будет использовать тактику 1 (мы имеем в виду автомат с очень глубокой памятью в состоянии  $K$ ). Тогда за 100 клеваний автомат получит +60 единиц дохода от клевания мух и -40 единиц штрафа от клевания ос. Полная сумма будет равна +20, а средний доход равен  $20/100$ , т.е. 0,2. Это максимальный средний доход, который можно получить в данной среде, имея в своем распоряжении две вышеуказанные тактики поведения. Теперь попробуйте найти средний доход для автомата с одной ячейкой памяти  $K$  и одной ячейкой памяти  $Y$ .

Если вы верно решите задачу, то увидите, что средний доход меньше 0,2, т.е. автомат слишком сильно «мечется»; как только встретится оса, он меняет тактику, а ведь скорее всего потом будет муха, которую он упустит.

С другой стороны, имеет свои недостатки и автомат со слишком глубокой памятью. Такому автомату трудно переучиваться. Пусть, например, глубина памяти равна 1000. Пусть утром летает больше мух, а вечером — ос. Но за утро автомат уйдет слишком глубоко в ячейки памяти  $K$  и вечером получит большой штраф. В зависимости от особенностей среды выгодно иметь ту или иную глубину памяти.

3.17. Придумайте нейронную сеть, которая будет вести себя как автомат с линейной тактикой, имеющий глубину памяти в 3 ячейки. У сети должно быть 4 детектора (вкус муки и боль от жала осы при клевании и узнавание муки и узнавание осы при рассмотрении добычи) и два командных нейрона, запускающих клевание и рассматривание.

3.18. Автомат с линейной тактикой может иметь не два возможных способа поведения, а три или больше. Нарисуйте схему переходов, подобную изображенной на рис. 52, для автомата Цетлина с тремя способами поведения.

Автомат Цетлина при штрафе постоянно двигается по ячейкам памяти по направлению к другому действию, а при поощрении данного действия — в глубину памяти, соответствующей данному действию. Иначе ведет себя другой автомат, который тоже умеет учиться в случайной среде (его называют по имени автора автоматом Кринского). При штрафах он ведет себя так же, как автомат с линейной тактикой, — медленно двигается по ячейкам памяти по направлению к смене действия, т. е. к ячейкам памяти с меньшим номером. Но при поощрении он из любой ячейки памяти  $K$  сразу переходит в самую глубокую (для рис. 52. он сразу уйдет в ячейку  $K_5$ , встретив муху), так же он ведет себя и при поощрении, находясь в ячейках  $U$ .

3.19. Нарисуйте схему переходов по ячейкам памяти для автомата Кринского. Придумайте нейронную сеть, имитирующую поведение этого автомата.

Существует много других конструкций автоматов. Например, В. А. Пономарев придумал автомат, который получает максимальный доход в самых разных средах, не меняя глубины памяти (мы видели, что для автомата с линейной тактикой в разных средах выгодно иметь память разной глубины).

В заключение заметим, что в современной математике существует интересное направление, которое называется *теорией игр*. Эта теория имеет широкое поле применения. В частности, теорию игр используют в экологии, рассматривая поведение животного в некоторой среде как своеобразную игру с природой. Поведение обучающихся автоматов, описанное выше, тоже

можно рассматривать как игру со средой: среда «делает ход», предлагая или муху, или осу; автомат делает ответный ход, нападая на добычу или упуская ее, и т.д. Рассмотренные автоматы в этой игре, несмотря на простоту конструкции, получают максимально возможный выигрыш.

### *Дополнительные задачи*

Ниже приведено несколько задач, которые не вошли в основную часть пособия. Подумайте, какие типы нейронов целесообразно использовать при их решении.

6.1. Придумайте нейронную сеть, поддерживающую постоянную температуру тела человека. В чем принципиальное отличие системы температурной регуляции у бабочки крапивницы и у теплокровных животных?

6.2. У пиявки имеются две сердечные трубки, которые работают асимметрично: одна в так называемом «перистальтическом режиме», а другая — в «синхронном режиме». Каждое сердце управляется нейронами, лежащими в ганглиях брюшной цепочки: от 3-го до 19-го. Сердце, работающее в «перистальтическом режиме», управляется так. Сначала возбуждается нейрон, лежащий в самом заднем 19-м ганглии, с некоторым запозданием — нейрон в 18-м ганглии, и т.д. В результате по сердечной трубке «пробегают» волны сокращений. Каждый нейрон дает пачку импульсов, за которой следует пауза. Когда кончается пачка импульсов в самом переднем 3-м нейроне, кончается пауза в самом заднем 19-м нейроне, после чего вновь возбуждается нейрон 19 и т.д. В это время второе сердце управляется совершенно иначе. Все нейроны с 3-го по 19-й возбуждаются одновременно (синхронно). Их пачки возникают одновременно с пачкой импульсов в нейроне 19 «перистальтического сердца». После случайного числа циклов (от 20 до 60) происходит переключение режима: «перистальтическое» сердце начинает работать «синхронно», а «синхронное» — «перистальтически».

Придумайте нейронную сеть, которая может обеспечить такое управление работой сердца пиявки.

- 6.3. Некоторые рыбы, живущие в реках с быстрым течением, ведут себя следующим образом. Рыба всегда ориентируется так, что ее голова направлена навстречу течению, при этом рыба плывет с такой скоростью, что сохраняет свое положение относительно какого-то предмета, находящегося на дне (например, камня). В результате такого поведения рыба все время находится на определенной территории. Если такой рыбе надеть непрозрачные очки (рис. 53), она все равно верно ориентируется относительно течения, но плохо поддерживает нужную

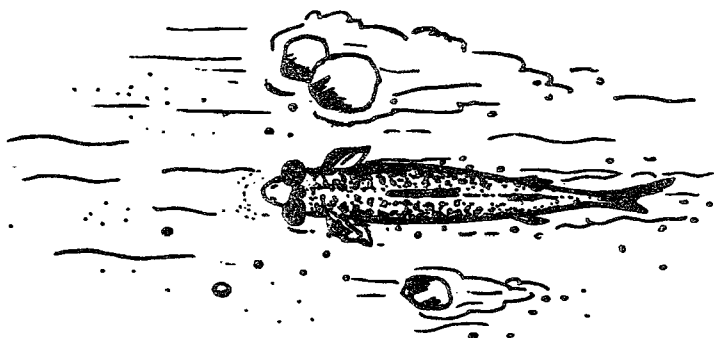


Рис. 53

скорость плавания (как правило, ее постепенно сносит вниз по течению). Придумайте нейронную сеть, которая обеспечивает такое поведение рыбы. Поясните, какие рецепторы необходимо использовать в работе сети и какие параметры внешней среды измеряют эти рецепторы.

- 6.4. В аквариуме содержатся рыбки, у которых вырабатывается условный рефлекс: они при виде мелких предметов, парящих в толще воды, бросаются к ним, принимая их за кусочки корма. Если в воду помещают большой предмет, он воспринимается рыбками как хищник, они разворачиваются и бросаются наутек (учтите: сначала — разворот, а потом — быстрое перемещение вперед). На своих собратьев и на



предметы равного с ними размера рыбки не реагируют. Как работает рецепторная система, оценивающая размеры помещенного в аквариум объекта, тоже надо придумать.

6.5. Вы учите собаку считать количество сигналов (миганий лампочки), вырабатывая рефлекс по следующей методике: один сигнал — не подкрепляется ничем, два сигнала — перед собакой появляется пища, три сигнала — даете болевое раздражение, четыре сигнала — даете болевое раздражение, пять сигналов — кормите. Рефлекс у собаки выработался — на соответствующее количество сигналов либо ничего не происходит, либо начинается слюноотделение, либо оно прекращается, и шерсть поднимается дыбом. Предложите нейронную сеть, которая могла бы отвечать за подобный рефлекс.

6.6. Для управления движениями важно знать как суставные углы, так и скорости их изменения. Эта задача может быть решена двумя разными способами. Можно иметь два типа суставных рецепторов: одни измеряют углы, другие — угловые скорости. Но можно иметь только рецепторы, измеряющие углы, а угловые скорости вычислять с помощью соответствующей нейронной сети. Придумайте конструкцию сети, которая получает от рецепторов значение суставных углов и вычисляет угловую скорость. (В более общей постановке это задача о нейронной сети, которая вычисляет производную некоторой функции по значениям этой функции в разные моменты времени или вообще при разных значениях аргумента.)

6.7. Представьте себе, что вы ввели микроэлектрод в ту часть нервной системы крапивницы, где находится нейронная сеть, управляющая поведением крыльез в зависимости от температуры (пусть это будет такая же сеть, как на рис. 6 (см. с. 16). Как определить, входит ли нейрон, который регистрирует микроэлектрод, в эту сеть, и если да, то каким из элементов сети он является?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Автоматы*. Сб. статей под редакцией К. Шеннона и Д. Маккарти. — М.: ИЛ, 1956.
2. *Арбиб М. Мозг, машина и математика*. — М.: Наука, 1968.
3. *Арбиб М. Метафорический мозг*. — М.: Мир, 1976.
4. *Беркинблит М.Б., Глаголева Е.Г. Электричество в живых организмах*. Библиотечка «Квант», вып. 69. — М.: Наука, 1988.
5. *Бонгард М.М. Проблема узнавания*. — М.: Наука, 1967.
6. *Гаазе-Ранпопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амёбы до робота: модели поведения*. — М.: Наука, 1988.
7. *Минский М., Пейперт С. Перцептроны*. — М.: Мир, 1971.
8. *Позин Н.В. Моделирование нейронных структур*. — М.: Наука, 1970.
9. *Позин Н.В. и др. Элементы теории биологических анализаторов*. — М.: Наука, 1976.
10. *Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики*. — М.: Мир, 1966.
11. *Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем*. — М.: Наука, 1969.

Большинство указанных книг требуют серьезной математической подготовки и трудны для школьника или учителя биологии. Они могут быть рекомендованы для работы с учениками математических спецклассов, интересующихся биологией. Однако книги [4] и [6] являются достаточно простыми, а в книгах [3], [5], [8], [9] и [11] некоторые разделы изложены вполне доступно для широкого читателя. В рекомендуемых книгах содержится ряд ссылок на более специальную литературу.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие . . . . .                                                                 | 3  |
| § 1. Нервные клетки и их взаимодействие . . . . .                                     | 6  |
| Немного истории. Нейронная сеть, описывающая поведение бабочки крапивницы . . . . .   | 14 |
| § 2. Нейронные сети из пороговых элементов со ступенчатой характеристикой . . . . .   | 19 |
| Отступление в область «большой науки» . . . . .                                       | 25 |
| Лирическое отступление о моделях . . . . .                                            | 27 |
| Приложение: задачи, придуманные учениками ВЗМШ . . . . .                              | 28 |
| § 3. Нейроны с линейной характеристикой . . . . .                                     | 41 |
| Детекторы и нейронные сети . . . . .                                                  | 46 |
| Моторные сети . . . . .                                                               | 56 |
| § 4. Нейронные сети из импульсных нейронов, работающих в потактовом времени . . . . . | 61 |
| § 5. Нейронные сети с памятью. Обучение . . . . .                                     | 72 |
| «Обучение с первого раза», условные рефлексы, привыкание . . . . .                    | 74 |
| Перцептроны и другие обучающиеся классификационные системы . . . . .                  | 79 |
| Случайные процессы. Забывание. Надежность . . . . .                                   | 86 |
| Дополнительные задачи . . . . .                                                       | 93 |
| Литература . . . . .                                                                  | 96 |