

Н. Винер

# НОВЫЕ ГЛАВЫ КИБЕРНЕТИКИ

*„Советское радио“*

НОРБЕРТ ВИНЕР

62-506.2

# НОВЫЕ ГЛАВЫ КИБЕРНЕТИКИ

УПРАВЛЕНИЕ И СВЯЗЬ  
В ЖИВОТНОМ И МАШИНЕ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО  
*И. В. СОЛОВЬЕВА*

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
*Г. Н. ПОВАРОВА*

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СОВЕТСКОЕ РАДИО»

МОСКВА — 1963

Настоящая книга содержит перевод новых глав известной книги «Кибернетика» выдающегося американского математика Норберта Винера. Первое издание «Кибернетики», где выдвигался проект создания новой общей науки «об управлении и связи в животном и машине», вышло в переводе на русский язык в 1958 г. Новые главы были написаны Н. Винером для второго американского издания «Кибернетики» 1961 года. В этих главах Н. Винер дает дальнейшее развитие своих идей; им исследуется внутренний механизм таких важнейших свойств живых организмов, как обучаемость, размножение (самовоспроизведение), самоорганизация, и обсуждаются проблемы построения сложных машин, также обладающих этими свойствами. Проблема самоорганизующихся систем изучается на явлениях электрической активности человеческого мозга («мозговых волн»). Книга выдвигает интересные технические и биологические проблемы и гипотезы и предназначена для широкого круга научных работников и инженеров.

## **О ВТОРОМ ИЗДАНИИ «КИБЕРНЕТИКИ» Н. ВИНЕРА**

**(От редактора перевода)**

В 1958 г. вышел русский перевод известной книги Норберта Винера «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине». Эта книга впервые увидела свет на английском языке в США и Франции в 1948 г., вызвав длительные и бурные споры на мировой научной арене. Читатель, конечно, знаком с общим ходом этих дискуссий, продолжающихся и поныне, как показывает, например, недавняя дискуссия в нашей «Литературной газете», где участвовали видные имена. Постепенно чистое отрицание кибернетики сменилось поисками в ней «рационального зерна» и признанием за ней важного значения, причем многие авторы предложили собственные концепции кибернетики, отличные от первоначальной винеровской.

В 1948 г. проф. Винер выступил лишь с общей программой, рисуя большими мазками свой замысел создания новой науки, долженствующей в порядке своеобразной «гибридизации» объединить результаты многих, до того далеких друг от друга наук. С тех пор под флагом кибернетики появилось большое число различных, в том числе весьма важных, исследований, существенно дополняющих и изменяющих первоначальную картину кибернетики. В 1961 г. в США появилось второе издание «Кибернетики» Н. Винера, где проф. Винер рассказывает о своих дальнейших работах по кибернетике и о других исследованиях, близких к его собственной линии. Текст первого издания «Кибернетики» (введение и восемь глав) вошел целиком во второе издание как первая часть книги. Вторую часть нового издания составили две новые главы, посвященные исследованиям после 1948 г.: гл. 9

**«Об обучающихся и самовоспроизводящихся машинах» и гл. 10 «Мозговые волны и самоорганизующиеся системы».** Кроме того, книге предпослано написанное специально для второго издания предисловие, излагающее общий замысел нового издания «Кибернетики» и обрисовывающее общую линию собственных исследований автора.

Издательство «Советское радио», выпустившее в 1958 г. русский перевод первого издания «Кибернетики», решило выпустить перевод новых глав второго издания. Настоящий перевод содержит предисловие автора ко второму изданию «Кибернетики» и вторую часть книги, т. е. упомянутые выше гл. 9 и 10. Предполагается, что читатель будет читать настоящую книгу «Новые главы кибернетики» после ознакомления с вышедшим в 1958 г. переводом первого издания «Кибернетики»<sup>1</sup> и при необходимости воспользуется обеими книгами одновременно.

Новые главы «Кибернетики» подобны старым в том отношении, что перед нами не учебник и не систематическая разработка определенной тематики, а свободное, проблемное изложение взглядов автора, его результатов и гипотез, с неожиданными экскурсами в далекие на первый взгляд области, со сложными математическими формулами на одних страницах и примерами из художественной литературы на других. Ко взглядам автора можно, разумеется, относиться по-разному, но сами по себе вопросы, обсуждаемые в новых главах «Кибернетики», имеют большое значение для техники и, можно думать, для биологии и медицины. Обучающиеся и самовоспроизводящиеся машины, самоорганизующиеся системы, биоэлектрическое управление — это новый шаг колоссального значения, который должна будет сделать и уже начинает делать современная автоматика, современная машинная техника. В частности, можно предполагать, что с точки зрения биоэлектрического управления электроэнцефалография с ее «мозговыми волнами» имеет большое техническое будущее.

Машины, которые появятся на новом, ожидаемом этапе развития техники, когда будет сделан указанный выше шаг, будут неизмеримо более гибкими и способными, неизмеримо более самостоятельными и могущественными, чем теперешние машины. Если, по примеру Винера, воспользоваться литературными аналогиями, то эти ма-

---

<sup>1</sup> Винер Н. Кибернетика, М., «Советское радио», 1958.

шины грядущего, пожалуй, можно было бы рискнуть уподобить сложным самодействующим машинам уэллсовских марсиан. Марсианские машины в «Борьбе миров» Уэллса как бы подражали в своей конструкции живым существам и даже принимались людьми за таковых; конечно, в наши дни их следовало бы несколько «модернизировать», скажем по части радиоэлектронного оснащения. Впрочем, такие аналогии всегда приходится воспринимать, как говорили в старину, *cum grano salis* — «со щепоткой соли».

Обсуждаемые в книге вопросы, несомненно, будут интересны также представителям биологических и медицинских наук. Проф. Винер затрагивает здесь проблемы эволюции видов, генетики, электрофизиологии и т. д. Не будучи ни биологом, ни медиком, я не могу позволить себе сказать многое по этому поводу и ограничусь лишь одним замечанием, которое мне кажется справедливым. Человек будущего вряд ли останется таким же «натуральным» существом, таким же теплокровным позвоночным, каким он вышел из горнила естественного отбора и каким он остается в целом и по сие время. В новый технический век он, по всей вероятности, будет очень широко употреблять различные высокоэффективные искусственные органы, и его организм в гораздо большей степени, чем сейчас, будет связан с новым искусственным окружением — высокотехнической, высокомеханизированной средой. Возникнет своего рода «физиологическая техника» или «техническая физиология» — симбиоз будущей, более совершенной техники и будущей, по-видимому тоже более совершенной физиологической науки. В этом отношении предмет настоящей книги представляет особый интерес, хотя, по-видимому, мы находимся только в начале пути.

Социально-политическим вопросам в новых главах «Кибернетики» уделяется меньше места, чем в старых, но Винер по-прежнему подчеркивает опасности, связанные со злоупотреблением могущественными силами современной науки и техники.

Конечно, при чтении Винера следует иметь в виду, что его мысли, технические и биологические, во многом гипотетичны и дискуссионны и что далеко не со всем у него надо соглашаться. Книга требует вдумчивого, критического подхода и самостоятельного суждения. Однако

в новых областях науки дискуссии особенно необходимы и плодотворны. Для кристаллизации истины требуется известное время и известное накопление фактов.

Большие события ожидают нас в технике. Чтобы подготовиться к ним и своевременно занять ключевые научно-технические позиции, необходимо всесторонне, глубоко анализировать и обсуждать различные направления научной мысли в новых областях науки, с их достижениями и их ошибками<sup>1</sup>.

*Г. Н. ПОВАРОВ*

Москва, 19 августа 1962 г.

---

<sup>1</sup> Здесь будет удобно воспользоваться случаем, чтобы исправить ошибку, вкравшуюся в перевод первого издания «Кибернетики». На стр. 196 русского издания 1958 г., в строках 17 и 16 снизу, стоит фраза: «Рынок — это игра, находящая свое подобие в семейной игре монополий». Ее следует читать так: «Рынок — это игра, находящая свое подобие в семейной игре «монополия». Здесь идет речь о распространенной в США своеобразной настольной игре. В этой игре символически приобретаются, продаются и обмениваются различные вещи, названия которых записаны на карточках. В конце игры эти вещи могут переводиться на деньги.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ Н. ВИНЕРА КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ «КИБЕРНЕТИКИ»**

Когда я писал первое издание «Кибернетики» около тринадцати лет назад, мою работу затрудняли некоторые серьезные помехи, следствием которых были многочисленные опечатки, наряду с некоторыми ошибками в содержании. Сейчас, как я полагаю, настало время пересмотреть кибернетику не только как программу, которую надлежит выполнить когда-нибудь в будущем, но и как существующую науку. Поэтому я воспользовался настоящей возможностью, чтобы внести необходимые исправления для моих читателей и одновременно дополнить книгу изложением современного состояния предмета и новых близких идей, появившихся со времени первого издания.

Если какая-нибудь новая отрасль науки является действительно жизненной, то центр интереса в ней должен и будет перемещаться с течением времени. Когда я писал «Кибернетику» в первый раз, главное препятствие, с которым я встретился при изложении своих мыслей, заключалось в том, что понятия статистической теории информации и управления были новыми и даже, возможно, противоречили установившимся взглядам того времени. Теперь они стали настолько обычными как рабочее оружие инженеров связи и проектировщиков устройств автоматического управления, что главная опасность, от которой я должен оградить себя, состоит в том, что книга может показаться банальной. Значение обратной связи в техническом проектировании и в биологии твердо установлено. Значение информации и методика измерения и передачи информации составляют целый предмет изучения для инженера, физиолога, психолога и социолога. Автоматы, которые лишь предсказывались в первом из-



дании книги, заняли подобающее им место, и связанные с этим социальные опасности, против которых я предостерегал не только в данной книге, но и в небольшой популярной книге «Человеческое использование человеческих существ»<sup>1</sup>, поднялись высоко над горизонтом.

Поэтому кибернетик должен двигаться к новым областям и обратить больше внимания на идеи, возникшие в течение последнего десятилетия. Простые линейные обратные связи, изучение которых сыграло такую большую роль в пробуждении интереса ученых к кибернетическим исследованиям, оказываются совсем не такими простыми и линейными, как представлялось сначала. В самом деле, в начальный период теории электрических цепей математические средства для систематического исследования цепей не выходили из области линейных комбинаций сопротивлений, емкостей и индуктивностей. Это означает, что весь предмет можно было достаточно верно описать в терминах гармонического анализа передаваемых сообщений и в терминах комплексных сопротивлений, комплексных проводимостей и отношений напряжений в цепях, через которые проходят сообщения.

Задолго до выхода в свет «Кибернетики» стало ясно, что изучение нелинейных цепей (подобных тем, которые мы встречаем во многих усилителях, ограничителях напряжения, выпрямителях и т. д.) не уместается в эти рамки. Тем не менее, ввиду отсутствия лучшей методики, предпринимались многочисленные попытки распространить линейные понятия прежней электротехники далеко за те границы, в которых ими можно было естественно представить новые типы устройств.

Когда я пришел в Массачусеттский технологический институт, примерно в 1920 г., общее направление постановки вопросов, касающихся нелинейных устройств, состояло в том, что стремились отыскать расширенное понятие комплексного сопротивления, которое охватывало бы как линейные, так и нелинейные системы. В результате нелинейная электротехника пришла в состояние, подобное состоянию птолемеевой системы астрономии в последний период ее существования, когда нагромождали эпицикл на эпицикл, поправку на поправку, пока все это

---

<sup>1</sup> Wiener N., The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society, Houghton Mifflin Co., Boston, 1950. (Есть русский перевод: Винер Н., Кибернетика и общество, М., ИЛ, 1958.—Ред.)

латаное сооружение не рухнуло под собственной тяжестью.

Как из крушения перенапряженной птолемеевой системы возникла коперникова система с ее простым и естественным гелиоцентрическим описанием движений небесных тел, заменившим сложную и запутанную картину геоцентрической птолемеевой системы, так и для изучения нелинейных устройств и систем, электрических или механических, естественных или искусственных, была необходима совершенно новая исходная точка зрения. Я попытался найти новый подход в своей книге «Нелинейные задачи в теории случайных процессов»<sup>1</sup>.

Оказывается, когда мы переходим к рассмотрению нелинейных систем, тригонометрический анализ, играющий такую преобладающую роль в изучении линейных систем, теряет свое значение. Это имеет совершенно четкое математическое объяснение. Явления в электрических цепях, как и многие другие физические явления, характеризуются инвариантностью при переносе начала отсчета во времени. Физический опыт, начатый в полдень и достигший определенного состояния к 2 часам дня, должен достигнуть такого же состояния к 2.15, если мы начнем его в 12.15. Таким образом, физические законы относятся к инвариантам группы переносов во времени.

Тригонометрические функции  $\sin nt$  и  $\cos nt$  обнаруживают важные инвариантные свойства относительно той же самой группы переносов. Функция общего вида  $e^{i\omega t}$  перейдет в функцию

$$e^{i\omega(t+\tau)} = e^{i\omega\tau} e^{i\omega t}$$

того же вида при переносе, которой получается от прибавления  $\tau$  к  $t$ . Как следствие,

$$\begin{aligned} a \cos n(t+\tau) + b \sin n(t+\tau) &= (a \cos n\tau + b \sin n\tau) \times \\ &\times \cos nt + (b \cos n\tau - a \sin n\tau) \sin nt = a_1 \cos nt + \\ &+ b_1 \sin nt. \end{aligned}$$

Другими словами, семейства функций

$$A e^{i\omega t}$$

и

$$A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

инвариантны при переносе.

<sup>1</sup> Wiener N., Nonlinear Problems in Random Theory, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

Существуют и другие семейства функций, инвариантные при переносах. Если рассматривать так называемое случайное блуждание, когда перемещение частицы за любой промежуток времени имеет распределение, зависящее только от длительности этого промежутка и не зависящее от каких-либо событий, происшедших до его начала, то ансамбль случайных блужданий также перейдет сам в себя при переносе во времени.

Другими словами, сама по себе инвариантность при переносе есть свойство тригонометрических кривых, которыми обладают и другие множества функций.

Свойство, характеризующее тригонометрические функции наряду с этой инвариантностью, заключается в том, что

$$A e^{i\omega t} + B e^{i\omega t} = (A + B) e^{i\omega t},$$

так что эти функции образуют чрезвычайно простое линейное множество. Заметим, что это свойство связано с линейностью, т. е. с тем обстоятельством, что мы можем свести все колебания данной частоты к линейной комбинации двух колебаний. Именно это специфическое свойство и обуславливает ценность гармонического анализа при исследовании линейных свойств электрических цепей. Функции  $e^{i\omega t}$  суть характеры группы переносов и образуют линейное представление этой группы<sup>1</sup>.

Но когда мы встречаемся с другими комбинациями тригонометрических функций, нежели сложение с постоянными коэффициентами, — например, когда мы перемножаем две функции, — то простые тригонометрические функции уже не обнаруживают этого элементарного группового свойства. С другой стороны, случайные функции, подобные тем, которые появляются при случайном блуждании, имеют некоторые свойства, весьма удобные для изучения их нелинейных комбинаций.

Я не хотел бы входить здесь в подробности вопроса, так как с математической стороны он является довольно сложным и разбирается в моей книге «Нелинейные задачи в теории случайных процессов». Материал названной книги уже использовался в значительной мере при исследовании частных нелинейных задач, но остается еще многое сделать для выполнения изложенной там программы.

---

<sup>1</sup> О группах и характерах групп см. Винер Н., Кибернетика, «Советское радио», 1958, гл. 2. — *Прим. ред.*

Практически дело сводится к тому, что в качестве удобного испытательного входного сигнала выступает уже не какое-либо множество тригонометрических функций, а функция, имеющая характер броуновского движения. Такая функция броуновского движения для электрических цепей может быть создана физически дробовым эффектом. Дробовой эффект есть явление нерегулярности электрических токов, возникающее из-за того, что токи представляют собой не непрерывный поток электричества, а последовательность неделимых и одинаковых электронов. Поэтому электрические токи подвержены обладающим известным единообразием статистическим колебаниям, которые могут быть усилены настолько, что составят заметный случайный шум.

Как я покажу в гл. 9, теорию случайного шума можно практически использовать не только для анализа электрических цепей и других нелинейных процессов, но и для их синтеза<sup>1</sup>. С этой целью применяют метод приведения выходного сигнала нелинейного устройства, получающего случайный входной сигнал, к вполне определенному ряду некоторых ортонормальных функций, тесно связанных с многочленами Эрмита. Задача анализа нелинейной цепи состоит в определении коэффициентов этих многочленов по параметрам входного сигнала путем усреднения.

Описание этого процесса довольно просто. Кроме черного ящика, изображающего еще не проанализированную нелинейную систему, у меня есть некоторые тела с известной структурой, которые я буду называть белыми ящиками и которые изображают разные члены искомого разложения<sup>2</sup>. Я ввожу один и тот же случайный шум в

<sup>1</sup> Здесь я употребляю термин «нелинейная система» не как понятие, исключающее линейную систему, но как понятие, охватывающее более широкий класс систем. Анализ нелинейных систем при помощи случайного шума применим к линейным системам, и его применяют на самом деле.

<sup>2</sup> Термин «черный ящик» и «белый ящик» суть удобные и образные выражения, значение которых не вполне определено. Я подразумеваю под черным ящиком устройство, подобное, например, четырехполюснику с двумя входными и двумя выходными полюсами, которое выполняет определенную операцию над настоящим и прошлым входного потенциала, но для которого мы не обязательно располагаем информацией о структуре, обеспечивающей выполнение этой операции. С другой стороны, белый ящик есть аналогичная цепь, в которой для обеспечения заданной зависимости между входной и выходной функциями мы связали входной и выходной потенциал в соответствии с определенным структурным планом.

черный ящик и в данный белый ящик. Коэффициент белого ящика в разложении черного ящика равен среднему произведению их выходных сигналов. Это среднее надо брать по всему ансамблю входных сигналов, создаваемых дробовым эффектом, но существует теорема, которая во всех случаях, кроме множества меры 0, позволяет заменять это среднее средним по времени. Чтобы получить среднее по времени, нам нужно иметь устройство, перемножающее выходные сигналы черного и белого ящиков, и усредняющее устройство, которое может быть основано на том, что разность потенциалов конденсатора пропорциональна его заряду и, следовательно, интегралу по времени от тока, текущего через конденсатор.

Не только можно определить один за другим коэффициенты каждого белого ящика, составляющего слагаемое в эквивалентном представлении черного ящика, но можно определить эти величины все одновременно. Можно даже при помощи соответствующих схем обратной связи заставить каждый белый ящик автоматически настраиваться на уровень, соответствующий коэффициенту этого белого ящика в разложении черного ящика. Таким способом мы можем построить сложный белый ящик, который, будучи соединен надлежащим образом с черным ящиком и получая тот же самый случайный входной сигнал, автоматически превратится в операционный эквивалент черного ящика, хотя его внутреннее строение может быть весьма отличным.

Эти операции анализа, синтеза и автоматической самонастройки белых ящиков по подобию черных могут выполняться и другими методами, принадлежащими проф. Амару Бозе<sup>1</sup> и проф. Габору<sup>2</sup>. Во всех этих методах используется какой-нибудь процесс подгонки или обучения, состоящий в выборе надлежащих входных сигналов для черного и белого ящиков и сравнении этих ящиков; и во многих методах, в том числе в методе проф. Габора, важную роль играют перемножающие устройства.

---

<sup>1</sup> Bose A. G., *Nonlinear System Characterization and Optimization*, IRE Transactions, IT-5, 1959, p. 30—40 (специальное приложение к IRE Transactions).

<sup>2</sup> Г а б о р Д., *Электронные изобретения и их влияние на цивилизацию*, Вступительная лекция 3 марта 1959 г., Имперский колледж естественных и технических наук при Лондонском университете, Англия.

Хотя имеется много способов электрического перемножения двух функций, задача эта технически нелегкая. С одной стороны, хороший перемножитель должен работать в широком диапазоне амплитуд. С другой стороны, он должен быть настолько быстроедействующим, почти мгновенным, чтобы точно работать на высоких частотах. Габор утверждает, что его перемножитель работает в диапазоне частот примерно до 1000 гц. В своей речи при вступлении в должность профессора электротехники в Имперском колледже естественных и технических наук Лондонского университета он не указал ни диапазона амплитуд, в котором может действовать его метод перемножения, ни достижимой степени точности. Я с нетерпением жду, чтобы эти данные были указаны и можно было оценить возможность использования такого перемножителя в различных устройствах.

Все эти системы, в которых некоторое устройство приобретает определенную структуру или функцию на основании прошлого опыта, приводят к весьма интересному новому подходу как в технике, так и биологии. В технике устройства такого рода можно применять для того, чтобы не только проводить игры и другие целевые действия, но и постоянно совершенствоваться при этом свое поведение на основании прошлого опыта. Я рассмотрю некоторые из этих возможностей в гл. 9 настоящей книги. В биологическом аспекте мы имеем по меньшей мере аналог того, что, быть может, является центральным явлением жизни. Для существования наследственности и для размножения клеток необходимо, чтобы переносящие наследственность составные части клеток — так называемые гены — были способны строить по своему образу другие подобные переносящие наследственность структуры. Поэтому было бы весьма заманчиво найти способ, посредством которого технические устройства могли бы производить другие устройства с функциями, подобными их собственным. Я отведу этому вопросу десятую главу, где, в частности, будет рассмотрено, каким образом колеблющиеся системы данной частоты могут привести другие колебательные системы к той же частоте.

Часто указывают, что создание молекул данного вида по образу существующих молекул аналогично применению шаблонов в технике, которое позволяет использовать функциональный элемент машины как образец, по

которому изготавливается другой подобный элемент. Образ шаблона является статическим, а молекула гена должна производить другую молекулу посредством какого-нибудь процесса. Я делаю пробное предположение, что образцовыми элементами, переносящими индивидуальность биологических веществ, могут быть частоты, скажем частоты молекулярных спектров, а самоорганизация генов может быть проявлением самоорганизации частот, которую я рассмотрю дальше.

Я уже говорил в общих чертах об обучающихся машинах. Отведу одну главу более подробному рассмотрению этих машин и их возможностей и некоторых проблем их применения. Пока же хочется сделать несколько замечаний общего характера.

Как мы увидим в гл. 1<sup>1</sup>, понятие обучающихся машин столь же старо, как и сама кибернетика. В случае описанных мною приборов управления артиллерийским зенитным огнем линейные характеристики предсказывающего устройства, используемого в какое-либо данное время, зависят от длительного знакомства со статистиками ансамбля временных рядов, которые мы хотим предсказать. Эти характеристики можно определить математически по изложенным в той главе принципам, но вполне возможно также придумать вычислительную машину, которая будет собирать эти статистики и вырабатывать кратковременные характеристики предсказывающего устройства на основании опыта, уже пережитого той самой машиной, которая используется для предсказания, и записываемого автоматически. Это может пойти гораздо дальше чисто линейного предсказывающего устройства. В ряде статей Каллианпура, Мазани, Акутовича и моих<sup>2</sup> развита теория нелинейного предсказания, которую можно, по крайней мере в принципе, механизировать аналогичным образом, с использованием долговременных наблюдений как статистической основы для кратковременного предсказания.

<sup>1</sup> См. Винер Н., Кибернетика, М., «Советское радио», 1958, гл. I. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Wiener N., and Masani P., The Prediction Theory of Multivariate Stochastic Processes, Part I, Acta Mathematica, 98, 111—150 (1957); Part II, там же, 99, 93—137 (1958). Также Wiener N., and Akutowicz E. J., The Definition and Ergodic Properties of the Stochastic Adjoint of a Unitary Transformation, Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, Ser. II, VI, 205—217 (1957).

И теория линейного предсказания, и теория нелинейного предсказания содержат некоторые критерии качества предсказания. Простейший, хотя отнюдь не единственный пригодный критерий — это критерий минимального среднего квадрата ошибки. Он применяется в частном виде в связи с функционалами броуновского движения, использованными мною для построения нелинейных устройств, поскольку различные члены моего разложения имеют некоторые свойства ортогональности. Эти свойства гарантируют, что частичная сумма конечного числа этих членов дает наилучшую имитацию устройства, которая может быть получена с этими членами при критерии среднего квадрата ошибки. Метод Габора также основан на критерии среднего квадрата ошибки, но в более общем виде, пригодном для временных рядов, полученных из опыта.

Понятие обучающихся машин можно распространить на гораздо более широкую область, нежели предсказывающие устройства, фильтры и тому подобные приборы. Особенно важно оно для изучения и построения машин, играющих в игры со встречными интересами, такие, как шашки. В этой области существенную работу выполнили Сэмьюэл<sup>1</sup> и Ватанабе<sup>2</sup> в лабораториях Международной корпорации деловых машин. Как и в случае фильтров и предсказывающих устройств, здесь подбираются какие-то функции временных рядов, на которые можно разложить функции гораздо более широкого класса. Выбранные функции могут включать численные оценки существенных величин, от которых зависит успех игры. Например, они включают число фигур с обеих сторон, господство над пространством, подвижность и т. д. В начале работы машины этим факторам даются пробные веса, и машина выбирает допустимый ход, имеющий максимальный общий вес. Эти действия машина проводит по жесткой программе, без какого-либо обучения.

Но иногда машина выполняет другую задачу. Она пробует разложить функцию, равную 1 при выигрыше, 0 при проигрыше и, скажем,  $1/2$  при ничьей, по различным функциям, выражающим факторы, которые машина способна

---

<sup>1</sup> Samuel A. L., Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers, IBM Journal of Research and Development, 3, 210—229 (1959).

<sup>2</sup> Watanabe S., Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation, IBM Journal of Research and Development, 4, 66—82 (1960).



учитывать. Таким образом, она определяет вновь вес этих факторов, чтобы суметь вести более сложную игру. Некоторые свойства таких машин будут мной рассмотрены в гл. 9, здесь же я должен сказать, что применение этих оценок позволяет машине обыграть своего программиста после 10—20 часов обучения и тренировки. Я также упомяну в этой главе о некоторых работах по аналогичным машинам, предназначенным для доказательства геометрических теорем и для имитации — в ограниченной степени — логики индукции.

Вся эта работа составляет часть теории и практики программирования программирования<sup>1</sup>, которые усиленно изучаются в Лаборатории электронных систем Массачусеттского технологического института. Здесь было установлено, что, если не применять какое-нибудь обучающееся устройство такого типа, программирование машины с жесткой схемой представляет собой очень трудную задачу и что существует настоятельная необходимость в устройствах для программирования этого программирования.

Но понятие обучающихся машин применимо не только к тем машинам, которые мы создаем сами, но и к тем живым машинам, которые мы называем «животными», и это дает возможность бросить новый свет на биологическую кибернетику. Здесь я хочу выделить среди множества современных исследований книгу супругов Стэнли-Джонсов о кибернетике живых систем<sup>2</sup>. В этой книге авторы отводят много места обратным связям, которые поддерживают рабочий уровень нервной системы, а также другим обратным связям, отвечающим на отдельные конкретные раздражения. Поскольку сочетание уровня системы с частными реакциями является в значительной степени мультипликативным, оно также нелинейно и связано с соображениями, подобными приведенным выше. Эта область сейчас усиленно развивается и, я надеюсь, в ближайшем будущем должна развиваться гораздо больше.

Машины с памятью и самовоспроизводящиеся машины, которые я до сих пор описывал, основаны в большой ме-

<sup>1</sup> Иными словами, речь идет об автоматизации программирования.—*Прим. ред.*

<sup>2</sup> Stanley-Jones D., and Stanley-Jones K., *Kybernetics of Natural Systems, A Study of Patterns of Control*, Pergamon Press, London, 1960.

ре, хотя и не полностью, на устройствах с весьма высокой специализацией, которые можно назвать копирувальными устройствами. Физиологические варианты того же процесса должны больше соответствовать особым методам, свойственным живым организмам, где копирование заменяется менее специализированным процессом, таким, при котором система самоорганизуется. Гл. 10 настоящей книги посвящается одному примеру процесса самоорганизации, а именно процессу, посредством которого образуются узкие, весьма специфические частоты в мозговых волнах. Она оказывается, таким образом, в значительной мере физиологическим двойником предыдущей главы, в которой я рассматриваю аналогичные процессы на более близкой к копированию основе.

Обнаружение таких резких частот в мозговых волнах и теории, предложенные мною для объяснения того, как они возникают, что они могут сделать и как их можно использовать в медицине, представляют, по моему мнению, новое существенное направление в физиологии. Подобные же идеи можно применять для объяснения многих других физиологических явлений, и они могут внести значительный вклад в изучение основ явлений жизни. В этом направлении я даю скорее программу, чем законченное исследование, но программу, на которую я возлагаю большие надежды.

В мои намерения ни в первом издании книги, ни в настоящем не входило дать конспект всего, что было сделано в кибернетике. Это не соответствует ни моим интересам, ни моим возможностям. Моя цель — изложить и дополнить мои мысли по этому предмету и представить некоторые идеи и философские размышления, которые побудили меня начать работу в данной области и продолжали интересовать меня при ее дальнейшем развитии. Таким образом, это книга весьма личного характера, уделяющая много места исследованиям, которыми я сам интересовался, и относительно мало — исследованиям, в которых я сам не участвовал.

При пересмотре книги я получил ценную помощь от многих лиц. В частности, я должен выразить признательность за сотрудничество мисс Констанции Д. Бойд из издательства Массачусеттского технологического института, д-ру Сикао Икехара из Токийского технологического института, д-ру Ю. В. Ли с электротехнического факуль-

тата Массачусеттского технологического института и д-ру Гордону Рейсбеку из Белловских телефонных лабораторий. Кроме того, при написании новых глав, и в особенности в вычислениях для гл. 10, в которой я рассматривал самоорганизующиеся системы, обнаруживаемые при изучении электроэнцефалограмм, мне помогали мои ученики Джон Котелли и Чарлз Э. Робинсон, и особенно я должен упомянуть участие д-ра Джона С. Барлоу из Массачусеттской главной больницы. Указатель<sup>1</sup> составил Джеймс У. Дэйвис.

Без постоянной заботы и преданности всех этих лиц у меня не хватило бы мужества и прилежания, чтобы выпустить новое исправленное издание.

*Норберт ВИНЕР*

Кембридж, Массачусетс,  
март 1961 г.

---

<sup>1</sup> Этот предметный указатель в настоящем переводе опущен, зато мы прилагаем к книге именной указатель. — *Прим. ред.*

### ГЛАВА 9

#### ОБ ОБУЧАЮЩИХСЯ И САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИХСЯ МАШИНАХ

К числу явлений, которые мы считаем характерными для живых систем, относится способность обучаться и способность воспроизводить самих себя. Эти свойства, хотя и кажутся различными, тесно связаны между собой. Обучающееся животное — это животное, которое может преобразоваться под действием своего прошлого окружения в другое существо и может поэтому приспособиться к окружению в течение своей индивидуальной жизни. Размножающееся животное — это животное, которое может создавать других животных по своему подобию, по крайней мере приближенно, хотя подобие не настолько полно, чтобы они не могли изменяться с течением времени. Если эти изменения сами окажутся наследуемыми, появляется сырой материал, над которым может работать естественный отбор. Если наследуемыми особенностями являются типы поведения, то среди различных распространяющихся типов поведения некоторые окажутся благоприятными для продолжения существования расы и сохранятся, а другие окажутся вредными и будут устранены. Таким образом, происходит своеобразное расовое, или филогенетическое, обучение, в отличие от онтогенетического обучения индивидуума. И онтогенетическое, и филогенетическое обучение суть способы, которыми животное может приспособиться к своему окружению.

Обе формы обучения, и в особенности филогенетическое обучение, свойственны не только всем животным, но и растениям — и по существу всем организмам, которые в каком-либо смысле можно считать живыми. Однако значение этих двух форм обучения у различных видов жи-

вых существ может быть весьма различно. У человека — и в меньшей степени у других млекопитающих — онтогенетическое обучение и индивидуальная приспособляемость достигли высшей ступени. По существу можно сказать, что весьма большая часть филогенетического обучения человека была посвящена установлению возможности хорошего онтогенетического обучения.

Джулиан Хаксли в своем фундаментальном труде о разуме птиц<sup>1</sup> указал, что у птиц способность к онтогенетическому обучению невелика. То же самое относится к насекомым, и в обоих случаях это может быть связано с огромными требованиями, предъявляемыми к индивидууму полетом, с вытекающим отсюда полным поглощением способностей нервной системы, которые в противном случае могли бы быть применены к онтогенетическому обучению. Как ни сложны типы поведения птиц: полет, ухаживание, забота о птенцах, постройка гнезд, они выполняются правильно с первого раза, не требуя каких-либо пространных указаний со стороны матери.

Вполне уместно посвятить одну из глав книги этим двум взаимосвязанным вопросам: могут ли созданные человеком машины обучаться и могут ли они воспроизводить самих себя? Мы попытаемся показать в этой главе, что они действительно могут обучаться и воспроизводить самих себя, и мы опишем технику, необходимую для той и другой деятельности.

Более простым из этих двух процессов является обучение, и именно здесь техническое развитие пошло дальше. Я буду говорить, в частности, об обучении играющих машин, которое дает им возможность совершенствовать свою стратегию и тактику на основании опыта.

Существует признанная теория игр — теория фон Неймана<sup>2</sup>. Она занимается линией поведения (а policy), которую лучше всего рассматривать идя от конца игры, а не от начала. На последнем ходе игры игрок стремится сделать, если возможно, выигрышный ход, а если это невозможно, то по крайней мере ход, приводящий к ничьей.

---

<sup>1</sup> Huxley J., *Evolution: The Modern Synthesis*, Harper Bros., New York, 1943.

<sup>2</sup> Von Neumann J., and Morgenstern O., *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton, New York, 1944.

Его противник на предыдущем этапе стремится сделать ход, который помешает другому игроку сделать выигрышный или ничейный ход. Если он сам может сделать на этом этапе выигрышный ход, он сделает таковой, и это будет не предпоследний, а последний этап игры. Другой игрок на ходе, предшествующем данному, будет пытаться действовать таким образом, чтобы все усилия его противника не помешали ему закончить партию выигрышным ходом, и т. д.

Существуют игры, такие, как игра в крестики и нулики, где вся стратегия известна и подобную линию поведения можно проводить с самого начала. Если такое возможно, то это явно наилучший способ игры. Но во многих играх, таких, как шахматы и шашки, наше знание недостаточно для полного осуществления подобной стратегии, и тогда мы можем лишь приближаться к ней. Теория приближения фон-нейманова типа учит игрока действовать с крайней осторожностью на основании допущения, что его противник — совершенный мастер.

Однако такая установка не всегда оправдана. На войне, являющейся видом игры, она, как правило, будет вести к нерешительным действиям, которые во многих случаях будут немногим лучше поражения. Приведу два исторических примера. Когда Наполеон сражался с австрийцами в Италии, его успех отчасти был обусловлен тем, что ему было известно ограниченное и традиционное военное мышление австрийцев и он с полным основанием мог полагать, что они не способны использовать новые, требующие решительных действий методы войны, введенные солдатами французской революции. Когда Нельсон сражался с объединенными флотами континентальной Европы, у него было то преимущество, что он командовал флотом, который господствовал на морях в течение многих лет и в котором выработались методы мышления, недоступные, как ему было хорошо известно, для его противников. Если вместо того, чтобы полностью использовать это преимущество, он действовал бы осторожно на основании допущения, что противник имеет такой же военно-морской опыт, он, возможно, выиграл бы в конце концов войну, но не смог бы одержать такую быструю и решительную победу и установить непроницаемую морскую блокаду, которая в конечном счете привела к падению Наполеона.

Итак, в обоих случаях руководящим принципом была известная репутация командира и его противников, проявившаяся статистически в их прошлых действиях, а не стремление проводить совершенную игру против совершенного противника. Непосредственное применение метода теории игр фон Неймана в этих случаях не принесло бы пользы.

Подобно этому, учебники шахматной теории написаны не с точки зрения фон Неймана. Они представляют собой собрания принципов, извлеченных из практического опыта шахматистов, игравших против других шахматистов высокой квалификации и больших знаний, и они устанавливают определенные стоимости или веса, присваиваемые потере каждой фигуры, подвижности, господству над пространством, развитию сил и другим факторам, изменяющимся в ходе партии.

Не очень трудно сделать машины, которые будут играть в шахматы подобным образом.

Простое соблюдение законов игры, при котором делаются лишь разрешенные ходы, легко осуществимо на весьма простых вычислительных машинах. В самом деле, для этой цели нетрудно приспособить обычную цифровую машину. Теперь встает вопрос о линии поведения в рамках правил игры. Всякие оценки фигур, господства, подвижности и так далее, по существу, могут быть сведены к количественным выражениям, и, когда это сделано, можно применить принципы, изложенные в шахматном учебнике, чтобы найти лучшие ходы на каждом этапе игры. Такие машины созданы, и они будут играть очень хорошие любительские партии, но пока что не партии на уровне мастера

Представьте себе, что вы играете в шахматы против такой машины. Чтобы сделать ситуацию справедливой, предположим, что вы играете заочно, не зная, что играете против такой машины, и, следовательно, без предубеждений, которые могли бы возникнуть, если бы вы знали это. Естественно, как всегда бывает в шахматной игре, вы составите некоторое суждение о шахматной индивидуальности вашего противника. Вы обнаружите, что, когда на доске возникает дважды одно и то же положение, ваш противник будет реагировать каждый раз одинаковым образом, и вы решите, что его поведение весьма негибкое. Если какой-нибудь из ваших приемов достигнет це-

ли, то этот прием всегда будет достигать цели при тех же самых условиях. Поэтому искусному игроку не очень трудно выработать надлежащую линию игры против противника-машины и все время обыгрывать ее.

Однако существуют машины, которые нельзя обыгрывать так тривиально. Предположим, что машина через каждые несколько игр делает перерыв и использует свои способности для другой цели. На этот раз она не играет с противником, но исследует все предшествующие игры, записанные у нее в памяти, чтобы определить, какие веса различных оценок фигур, господства, подвижности и т. п. приводят чаще всего к выигрышу. Таким образом, она учится не только на своих неудачах, но и на успехах противника. После этого она заменяет свои прежние оценки новыми и начинает играть как другая, лучшая машина. Такая машина уже не будет иметь жесткой индивидуальности, и приемы, бывшие прежде успешными против нее, потерпят в конце концов неудачу. Более того, она может с течением времени усвоить нечто из стратегии своих противников.

Все это очень трудно сделать в шахматах, и на практике этот метод не был разработан настолько, чтобы создать машину, способную играть в шахматы как мастер. Шашки представляют более легкую задачу. Вследствие одинаковой ценности фигур сильно уменьшается число комбинаций, которые нужно рассматривать. Кроме того, отчасти вследствие этой однородности, шашечная игра гораздо легче делится на отдельные стадии, нежели шахматная. Даже в шашках главная задача эндшпиля уже не в том, чтобы брать фигуры, а в том, чтобы устанавливать контакт с противником, добываясь позиций, позволяющих брать фигуры. Подобно этому оценка ходов в шахматной партии должна делаться независимо на различных стадиях. Не только эндшпиль отличается от миттельшпиля в важнейших отношениях, но и в дебютах выдвижение фигур в положение, обеспечивающее свободу движений для нападения и защиты, имеет гораздо большее значение, чем в миттельшпиле. Поэтому мы даже приближенно не можем удовольствоваться равномерной оценкой различных весовых факторов для игры в целом, но должны разбить процесс обучения на ряд отдельных этапов. Только тогда мы можем надеяться построить обучающуюся машину, которая сможет играть в шахматы как мастер.



Ранее в этой книге в связи с задачей предсказания было упомянуто об идее программирования первого порядка, которое может быть в некоторых случаях линейным, в сочетании с программированием второго порядка, в котором для определения линии поведения в программировании первого порядка используется значительно больший отрезок прошлого. Предсказывающее устройство использует ближайшее прошлое полета самолета для предсказания будущего при помощи линейной операции; но отыскание правильной линейной операции есть статистическая задача, в которой долгое прошлое этого полета и прошлое многих подобных полетов используются для получения статистической основы.

Статистические исследования, необходимые для того, чтобы использовать долгое прошлое при определении линии поведения, выбираемой на основании короткого прошлого, являются в высшей степени нелинейными. Действительно, при использовании уравнения Винера—Хопфа<sup>1</sup> для предсказания коэффициенты этого уравнения разыскиваются нелинейным методом. В общем случае обучающаяся машина действует при помощи нелинейной обратной связи. Играющая в шашки машина, описанная Сэмьюэлом<sup>2</sup> и Ватанабе<sup>3</sup>, может выучиться обыгрывать своего программиста вполне закономерным образом после 10—20 рабочих часов программирования.

Философские идеи Ватанабе о применении программирующих машин чрезвычайно интересны. С одной стороны, метод доказательства элементарной геометрической теоремы, оптимальным образом отвечающий определенным критериям изящества и простоты, рассматривается Ватанабе как обучение игре, но не против индивидуального противника, а против, так сказать, «полковника Боуги»<sup>4</sup>. Аналогичная игра, которую изучает Ватанабе,

---

<sup>1</sup> Wiener N., Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications, The Technology Press of M. I. T., and J. Wiley & Sons, New York, 1949.

<sup>2</sup> Samuel A. L., Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers, IBM Journal of Research and Development, **3**, 210—229 (1959).

<sup>3</sup> Watanabe S., Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation, IBM Journal of Research and Development, **4**, 66—82 (1960).

<sup>4</sup> Полковник Боуги (Colonel Bogey) — воображаемый игрок, который всегда играет безупречно (в гольфе). — *Прим. ред.*

разыгрывается при логической индукции, когда, желая создать теорию, являющуюся оптимальной в таком же квазиэстетическом разрезе (т. е. по соображениям экономичности, простоты подхода и т. п.), мы определяем оценки конечного числа параметров, оставленных свободными. Несмотря на ограниченность такой логической индуктивной игры, она вполне заслуживает изучения.

Теория играющих машин проливает свет на многие виды борьбы, которые мы обычно не считаем играми. Любопытный пример — борьба мангусты со змеей. Как указывает Киплинг в «Рикки-Тикки-Тави», мангуста не является невосприимчивой к яду кобры, хотя она до некоторой степени защищена своей жесткой шкурой, которую змее трудно прокусить. По описанию Киплинга, эта борьба — настоящая игра со смертью, состязание в мускульной ловкости и проворстве. Нет основания считать, что у мангусты движения быстрее или точнее, чем у кобры. Тем не менее мангуста почти всегда убивает кобру и выходит из борьбы без единой царапины. Как ей удается это?

Я даю здесь объяснение, которое мне кажется верным и которое я составил, когда посмотрел такое сражение, а также кинофильмы о других подобных сражениях. Я не гарантирую правильности ни своих наблюдений, ни своих интерпретаций. Мангуста начинает с ложного выпада, который вызывает бросок змеи. Мангуста увертывается и делает еще выпад, так что противники действуют в некотором ритме. Но эта пляска не статическая, а постепенно прогрессирующая. Свои выпады мангуста делает все раньше и раньше по отношению к броскам кобры и, наконец, нападает в тот момент, когда кобра вытянулась во всю длину и не может двигаться быстро. На сей раз мангуста не делает ложного выпада, а точным броском прокусывает мозг змеи и убивает ее.

Другими словами, образ действия змеи сводится к одиночным, не связанным между собой броскам, тогда как мангуста действует с учетом некоторого, хотя и не очень большого отрезка всего прошлого хода сражения. В этом отношении мангуста действует подобно обучающейся машине, и действительная смертоносность ее нападения основана на гораздо более высокой организации нервной системы.

Как это видно из шедшего несколько лет тому назад фильма Уолта Диснея, нечто очень похожее происходит, когда одна из наших западных птиц, кукушка-подорожник (goad runner), нападает на гремучую змею. Хотя птица сражается клювом и когтями, а мангуста — зубами, их образ действия очень схож. Другой замечательный пример того же самого — бой быков. Не нужно забывать, что бой быков не спорт, а игра со смертью, в которой обнаруживается красота переплетающихся, взаимосвязанных движений быка и человека. Честность по отношению к быку здесь неуместна, и мы можем оставить без учета предварительное подстрекание и ослабление быка, имеющие целью довести борьбу до той ступени, где полностью проявляется взаимодействие схем движений противников. Искусный торреадор имеет большой запас возможных действий, как размахивание плащом, различные увертки и пируэты и т. п., которые должны привести быка в позицию, где он, остановившись после броска вперед, вытянулся во всю длину в то самое мгновение, когда торреадор готов вонзить ему шпагу в сердце.

Сказанное выше о борьбе мангусты с коброй или торреадора с быком можно отнести также к физическим состязаниям человека с человеком. Рассмотрим поединок на рапирах. Он состоит из последовательности обманных движений, парирований и выпадов, причем каждый из противников стремится отвести рапиру другого настолько, чтобы иметь возможность попасть в него, не раскрываясь самому и не подвергая себя ответному удару. Точно так же в теннисном чемпионате не достаточно хорошо подать или отбить мяч в каждом отдельном ударе; стратегия игры состоит в том, чтобы рядом отражений последовательных подач постепенно ухудшить положение противника настолько, что в конце концов ему трудно будет отразить мяч как следует.

И эти физические состязания, и игры такого рода, какие мы предполагали для играющих машин, содержат тот же самый элемент обучения через накопление опыта о навыках противника и о своих собственных. То, что верно относительно игр физического столкновения, верно и относительно состязаний, в которых умственный элемент представлен сильнее, таких, как война и игры, имитирующие войну, посредством которых наши штабные офицеры приобретают военный опыт. Это верно как для класси-

ческой войны на суше и на море, так и для новой, еще не испытанной войны с атомным оружием. Во всех этих столкновениях можно применить некоторую механизацию, аналогичную механизации шашек при помощи обучающихся машин.

Самая большая опасность сейчас — это III мировая война. Заслуживает внимания вопрос: в какой мере часть этой опасности может корениться в неосмотрительном применении обучающихся машин? Много раз я слышал утверждение, что обучающиеся машины не могут подвергнуть нас каким-либо новым опасностям, потому что мы можем выключить их когда захотим. Но действительно ли можем? Чтобы действительно выключить машину, мы должны получить информацию, что наступило опасное положение. То обстоятельство, что мы создали машину, еще не гарантирует, что мы будем иметь надлежащую информацию для такого действия. Этот вывод уже содержится неявно в утверждении, что шашечная машина может обыграть своего программиста, и притом после очень небольшого времени подлаживания к нему. Кроме того, самое быстрое действие современных цифровых машин может воспрепятствовать нам заметить и продумать признаки опасности.

Мысль о нечеловеческих устройствах, наделенных большим могуществом и большой способностью проводить свою линию поведения, и об их опасности для нас не имеет в себе ничего нового. Ново лишь то, что теперь мы обладаем эффективными устройствами такого рода. В прошлом подобные возможности постулировались для методов магии и волшебства, составляющих тему множества легенд и народных сказок. В этих сказках тщательно разбирается моральное положение волшебника. Я уже рассматривал некоторые аспекты легендарной этики волшебства в своей предыдущей книге, озаглавленной «Человеческое использование человеческих существ»<sup>1</sup>. Повторю здесь кое-что из сказанного там, чтобы связать это с обучающимися машинами.

Хорошо известна волшебная сказка из стихотворения Гёте «Ученик чародея». В этой сказке чародей оставляет своего ученика и помощника одного, приказав ему

---

<sup>1</sup> Wiener N., *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*, Houghton Mifflin Co., Boston, 1950 (русский перевод: «Кибернетика и общество», Изд-во иностранной литературы, 1958.—Ред.)

принести воды. Ленивый и хитрый юноша поручает эту работу метле, произнеся волшебные слова, слышанные им от учителя. Метла покорно делает за него работу и не хочет остановиться. Юноша едва не тонет. Он обнаруживает, что не выучил или забыл второе заклинание, которое должно остановить метлу. В отчаянии он хватается метлу, переламинает ее о колено и к своему ужасу видит, что обе половины продолжают носить воду. К счастью, прежде чем он окончательно погиб, возвращается учитель, произносит Слова Могущества, останавливающие метлу, и задает порядочный нагоняй ученику.

В «Тысяче и одной ночи» есть сказка о рыбаке и джине. Рыбак вытащил сетью кувшин, запечатанный печатью Соломона. В этот сосуд Соломон заключил мятежного джина. Джин выходит в виде гигантского облака дыма и говорит рыбаку, что в первые годы своего заточения он хотел вознаградить своего спасителя могуществом и богатством, а теперь решил убить его тут же на месте. К счастью для рыбака, ему удастся уговорить джина войти опять в бутылку, которую он бросает на дно океана.

Еще страшнее притча об обезьяньей лапе, рассказанная английским писателем начала XX в. У. У. Джекобсом. Старый, удалившийся на покой английский рабочий сидит за столом со своей женой и другом, вернувшимся из Индии британским сержантом. Сержант показывает хозяевам талисман в виде высушенной, сморщенной обезьяньей лапы. Один индийский святой человек, хотевший доказать, как безумно искушать судьбу, наделил эту лапу способностью исполнить три желания каждого из трех человек. Солдат говорит, что не знает первых двух желаний ее первого владельца, но последнее было — смерть. Сам он, — объявляет сержант друзьям, — второй ее владелец, но не будет рассказывать о своих страшных переживаниях. Он бросает лапу в огонь, однако его друг спасает лапу и хочет испытать ее силу. Его первое желание — получить 200 фунтов стерлингов. Вскоре раздастся стук в дверь, и в комнату входит служащий фирмы, где работает его сын. Отец узнает, что сын убит машиной, но фирма, хотя и отклоняет от себя всякую ответственность и не признает за собой никаких обязательств, желает предложить отцу в виде вознаграждения 200 фунтов. Убитый горем отец говорит свое второе желание — чтобы

сын вернулся, и когда опять раздается стук в дверь и она открывается, появляется нечто, представляющее собой — об этом много не говорится — призрак сына. Последнее желание — чтобы призрак удалился прочь <sup>1</sup>.

Во всех этих рассказах суть в том, что волшебные силы выполняют все дословно; и если мы просим у них какого-нибудь дара, мы должны просить то, что нам действительно желательно, а не то, что нам кажется желательным. Новые и реальные силы обучающейся машины также выполняют указания буквально. Если мы программируем машину на победу в войне, то должны ясно представлять себе, как мы понимаем победу. Обучающаяся машина должна программироваться опытом. Единственный опыт ядерной войны, который не приводит сразу же к катастрофе, это опыт военной игры. Если мы хотим использовать этот опыт как руководство для нашего поведения в настоящей войне, ценности победы, которыми мы пользовались в играх программирования, должны быть теми самыми ценностями, к которым мы стремимся в настоящей войне. Ошибка в этом отношении может означать лишь немедленную, полную и окончательную гибель. Мы не можем рассчитывать на то, что машина будет подражать нам в тех предрассудках и эмоциональных компромиссах, благодаря которым мы позволяем себе называть разрушение победой. Если мы требуем победы и не знаем, что подразумеваем под этим, мы встретимся с призраком, стучащим к нам в дверь.

На этом кончим с вопросом об обучающихся машинах. Теперь следует сказать кое-что о самораспространяющихся машинах. Здесь важны оба слова: «машина» и «самораспространяющаяся». Машина — не только материальная форма, но и средство выполнения определенных целей. И самораспространение — не просто создание осязаемой копии, но и создание копии, способной к тем же самым функциям.

Здесь возможны два разных подхода. Один из них, чисто комбинаторный, связан с вопросом: может ли машина иметь достаточно много частей и достаточно слож-

<sup>1</sup> Уильям Уимарк Джекобс (1863—1943) ныне у нас забыт, но в 10—20-х годах в России издавалось много его переводов. Переведен и этот рассказ, самое известное его произведение (Джекобс В. В., Обезьянья лапа, Шесть рассказов, Спб., Акц. о-во типографск. дела, 1912). Любопытно, что Джекобс в целом писатель-юморист. — *Прим. ред.*

ную структуру, чтобы самовоспроизведение могло быть в числе ее функций? На этот вопрос дал положительный ответ покойный Джон фон Нейман. Другой вопрос касается действительной рабочей процедуры для построения самовоспроизводящихся машин. Здесь я ограничусь одним классом машин, который, хотя и не охватывает всех машин, обладает большой общностью. Я имею в виду нелинейные преобразователи.

Эти машины представляют собой устройства, в которых входным сигналом служит одна функция времени, а выходным сигналом — другая функция времени. Выходной сигнал полностью определяется прошлым входного сигнала; но, вообще говоря, при сложении входных сигналов соответствующие выходные сигналы не складываются. Такие устройства называются преобразователями. Общим свойством всех преобразователей, линейных или нелинейных, является инвариантность относительно переноса во времени. Если машина выполняет некоторую функцию, то при сдвиге входного сигнала назад во времени выходной сигнал сдвигается назад на такой же интервал.

Наша теория самовоспроизводящихся машин основана на некоторой канонической форме представления линейных преобразователей. Здесь понятия комплексного сопротивления и комплексной проводимости, столь необходимые в теории линейных устройств, не вполне пригодны. Нам придется сослаться на некоторые новые методы получения такого представления, разработанные отчасти мною<sup>1</sup> и отчасти профессором Деннисом Габором<sup>2</sup> из Лондонского университета.

Хотя и методы профессора Габора, и мои собственные методы приводят к построению нелинейных преобразователей, эти методы являются линейными в том смысле, что выходной сигнал нелинейного преобразователя представляется как сумма выходных сигналов множества нелинейных преобразователей, на которые поступает один и тот же входной сигнал. Указанные выходные сигналы складываются с различными линейными коэффициента-

---

<sup>1</sup> Wiener N., *Nonlinear Problems in Random Theory*, New York, 1958.

<sup>2</sup> Электронные изобретения и их влияние на цивилизацию, Вступительная лекция 3 марта 1959 г., Имперский колледж естественных и технических наук при Лондонском университете, Англия.

ми. Это позволяет нам при расчете и задании нелинейного преобразователя применить теорию линейных разложений. В частности, это дает возможность найти коэффициенты составляющих элементов методом наименьших квадратов. Если сюда еще добавить метод статистического усреднения по множеству всех входных сигналов, которые могут поступать в наше устройство, то получится, по существу, один из разделов теории ортогональных разложений. Такую статистическую основу для теории нелинейных преобразователей можно получить фактическим изучением прошлых статистик входных сигналов, используемых в каждом частном случае.

Таковы в общих чертах методы Габора. Мои методы по существу аналогичны, но статистическая основа моей работы несколько иная.

Хорошо известно, что электрический ток не является непрерывным, а представляет собой поток электронов, подверженный статистическим отклонениям. Эти статистические флуктуации можно представить достаточно хорошо с помощью теории броуновского движения или аналогичной теории дробового эффекта, или лампового шума, о которых я собираюсь сказать кое-что в следующей главе. Во всяком случае, можно создать прибор, производящий стандартизированный дробовой шум со строго заданным статистическим распределением, и такой прибор выпускается промышленностью. Заметим, что ламповый шум является в некотором роде универсальным входным сигналом, поскольку его флуктуации, если их брать за достаточно долгое время, будут рано или поздно приближаться к любой данной кривой. Для лампового шума существует очень простая теория интегрирования и усреднения.

С помощью статистик лампового шума легко найти замкнутое множество нормальных и ортогональных нелинейных операций. Если входные сигналы, подвергаемые этим операциям, имеют статистическое распределение, присущее ламповому шуму, то среднее произведение выходных сигналов двух составляющих элементов нашего нелинейного преобразователя, взятое по статистическому распределению лампового шума, будет равно нулю. Кроме того, средний квадрат выходного сигнала каждого устройства можно нормировать к единице.



Тогда, чтобы получить разложение нелинейного преобразователя общего вида по этим составляющим элементам, можно применить известную теорию ортонормальных функций.

Конкретно, наши устройства дают выходные сигналы, представляющие собой произведения многочленов Эрмита от коэффициентов Лагерра для прошлого отрезка входного сигнала. Это подробно изложено в моих «Нелинейных задачах в теории случайных процессов».

Конечно, трудно найти среднее непосредственно по множеству возможных входных сигналов. Эта трудная задача становится осуществимой только благодаря тому, что входные сигналы, производимые дробовым эффектом, обладают свойством, которое называется метрической транзитивностью или эргодичностью. Для любой интегрируемой функции от параметра распределения входных сигналов, производимых дробовым эффектом, почти во всех случаях среднее по времени равно среднему по множеству. Вследствие этого мы можем взять два прибора, на которые поступает один и тот же дробовой шум, и найти среднее их произведение по всему множеству возможных входных сигналов путем перемножения их выходных сигналов и усреднения полученного произведения по времени. Для всех этих процессов необходимы лишь операции сложения напряжений, перемножения напряжений и усреднения по времени, для которых имеются соответствующие устройства. В действительности для методики Габора требуются те же устройства, что и для моей методики. Один из его учеников изобрел весьма эффективный и недорогой перемножитель, основанный на пьезоэлектрическом эффекте в кристалле, находящемся в поле двух магнитных катушек.

Итак, мы можем имитировать любой неизвестный преобразователь суммой линейных членов, обладающих каждый заданными характеристиками и регулируемым коэффициентом. Коэффициент можно найти как среднее произведение выходных сигналов неизвестного преобразователя и данного известного преобразователя, когда их входы соединены с одним и тем же генератором дробового шума. Более того, вместо того чтобы считывать этот результат на шкале прибора и переносить его вручную в соответствующий преобразователь; моделируя устройство по частям, можно без особого труда осуществить ав-

томатический перенос коэффициентов в элементы аппаратуры обратной связи. В итоге нам удалось создать белый ящик, который может потенциально приобрести характеристики любого нелинейного преобразователя, и затем сделать его подобным данному преобразователю—черному ящику, подав на входы приборов одну и ту же случайную функцию и соединив их выходы таким образом, чтобы получить надлежащую комбинацию без всякого вмешательства с нашей стороны.

Я спрашиваю, будет ли это философски весьма отличным от того, что происходит в организме, когда ген действует как шаблон, формирующий другие молекулы того же гена из неопределенной смеси аминокислот и нуклеиновых кислот, или когда вирус формирует другие подобные себе молекулы того же вируса из тканей и соков организма-хозяина. Я отнюдь не утверждаю, что подробности этих процессов одинаковы, но я утверждаю, что философски это весьма сходные явления.

---

## ГЛАВА 10

### МОЗГОВЫЕ ВОЛНЫ И САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

В предыдущей главе я рассматривал вопросы обучения и самораспространения по отношению к машинам и, по крайней мере по аналогии, к живым системам. Здесь я повторю некоторые соображения, которые высказал в предисловии и которые намерен использовать сейчас. Как я уже отмечал, эти два явления тесно связаны между собой: первое из них служит основой для приспособления индивидуума к окружению при помощи опыта, что можно назвать онтогенетическим обучением, а второе, поскольку оно дает материал, с которым может работать изменчивость и естественный отбор, служит основой для филогенетического обучения. Как я уже указывал, млекопитающие, и в частности человек, приспособляются к своему окружению в значительной мере путем онтогенетического обучения, а у птиц, с их весьма разнообразными типами поведения, которые не приобретаются на протяжении жизни индивидуума, гораздо большее значение имеет филогенетическое обучение.

Мы видели важность нелинейных обратных связей в возникновении обоих процессов. Настоящая глава посвящена изучению одной конкретной самоорганизующейся системы, в которой большую роль играют нелинейные явления. То, что мною здесь описано, я считаю происходящим при самоорганизации электроэнцефалограмм, или мозговых волн.

Прежде чем мы сможем разумно обсуждать эту тему, я должен сказать несколько слов о том, что такое мозговые волны и как их строение можно подвергнуть точно-

му математическому исследованию. Уже много лет было известно, что деятельность нервной системы сопровождается определенными электрическими потенциалами. Первые наблюдения в этой области восходят к началу прошлого столетия и были сделаны Вольтой и Гальвани на нервно-мышечных препаратах лягушачьей ноги. Это было рождение науки электрофизиологии. Однако до конца первой четверти нашего столетия эта наука развивалась довольно медленно.

Стоит подумать, почему развитие этой ветви физиологии было таким медленным. Для исследования физиологических электрических потенциалов сначала применялись гальванометры. Они имели два недостатка. Во-первых, вся энергия, необходимая для перемещения катушки или стрелки гальванометра, приходила из самого нерва и была очень маленькой. Второе затруднение состояло в том, что у тогдашних гальванометров подвижные части имели довольно значительную инерцию и для приведения стрелки во вполне определенное положение была необходима значительная устанавливающая сила, т. е. гальванометр неизбежно был не только регистрирующим, но и искажающим прибором. Самым лучшим из прежних физиологических гальванометров был струнный гальванометр Эйнтховена, в котором подвижные части сведены к одной проволоке. Как ни превосходил был этот прибор по тому времени, он не был достаточно точен, чтобы регистрировать малые электрические потенциалы, не внося больших искажений.

Таким образом, электрофизиология должна была ожидать появления новой техники. Это была электронная техника в двух формах. Одна из них была основана на открытии Эдисоном определенных явлений, относящихся к проводимости газов, откуда возникло применение электронной лампы для усиления. Это дало возможность достаточно верно преобразовывать слабые напряжения в сильные и тем самым позволило перемещать оконечные элементы регистрирующего прибора при помощи энергии, не создаваемой нервом, но управляемой им.

Второе изобретение также связано с электрическим током в вакууме и называется электронно-лучевым осциллографом. Благодаря осциллографу стало возможно применять в качестве движущейся части прибора гораздо более легкий якорь, чем в любом предыдущем галь-

ванометре, а именно — поток электронов. С помощью этих двух устройств, взятых порознь или вместе, физиологи нашего столетия сумели точно проследить изменение во времени малых напряжений, что было совершенно вне возможностей точных приборов XIX столетия.

При помощи этих средств мы могли получить точные записи изменения во времени очень малых напряжений между двумя электродами, помещенными на кожу головы или введенными в мозг. Хотя эти напряжения наблюдались и в XIX веке, возможность получения новых точных записей возбудила 20—30 лет тому назад большие надежды у физиологов. Ведущими в использовании таких приборов для непосредственного изучения деятельности мозга были Бергер в Германии, Эдриан и Мэттьюс в Англии и Джаспер, Дэйвис и супруги Гиббсы в Соединенных Штатах.

Нужно признать, что последующее развитие электроэнцефалографии до сих пор не оправдало розовых надежд, которые питали первые исследователи в этой области. Полученные ими данные записывались чернильным самописцем. Это очень сложные и неправильные кривые; и хотя можно было различить некоторые преобладающие частоты, как, например, альфа-ритм с частотой около 10 колебаний в секунду, записи чернилами были мало пригодны для дальнейшей математической обработки. В результате электроэнцефалография стала больше искусством, чем наукой, и зависела от способности тренированного наблюдателя распознавать определенные свойства чернильной кривой на основании большого опыта. Это вызвало весьма существенный упрек, что истолкование электроэнцефалограмм делается в значительной мере субъективным.

В конце 20-х и начале 30-х годов я заинтересовался гармоническим анализом непрерывных процессов. Хотя физики уже до этого изучали такие процессы, математический аппарат гармонического анализа почти весь ограничивался исследованием либо периодических процессов, либо процессов, которые в некотором смысле стремятся к нулю с возрастанием времени в положительном или отрицательном направлении. Моя работа была первой попыткой поставить гармонический анализ непрерывных процессов на твердую математическую основу. При этом я нашел, что основным понятием здесь является понятие

автокорреляции, которое уже применял Дж. И. Тэйлор (ныне сэр Джеффри Тэйлор) при изучении турбулентностей<sup>1</sup>.

Эта автокорреляция для функции времени  $f(t)$  представляет собой среднее по времени произведение  $f(t+\tau)$  на  $f(t)$ . Выгодно ввести комплексные функции времени, если даже в реальных случаях мы рассматриваем действительные функции. Тогда автокорреляция становится равной среднему произведению  $f(t+\tau)$  на сопряженную величину от  $f(t)$ . Работаем ли мы с действительными или с комплексными функциями, спектр мощности функции  $f(t)$  равен преобразованию Фурье от автокорреляции.

Я уже говорил о непригодности чернильных записей для дальнейшей математической обработки. Прежде чем ожидать многого от идеи автокорреляции, необходимо было заменить чернильные записи какими-либо другими записями, более пригодными для обработки.

Один из лучших способов записи малых флюктуирующих напряжений с целью дальнейшей обработки — это применение магнитной ленты. Она позволяет сохранять флюктуирующее электрическое напряжение в виде постоянной записи, которую можно затем использовать когда угодно. Один из таких приборов был придуман около десяти лет тому назад в научно-исследовательской лаборатории электроники Массачусеттского технологического института под руководством проф. Уолтера А. Розенблита и д-ра Мэри А. Б. Бразье<sup>2</sup>.

В названном приборе применяется запись на магнитную ленту с частотной модуляцией. Это сделано ввиду того, что считывание всегда связано с некоторым стиранием магнитной ленты. При записи с амплитудной модуляцией стирание приводит к изменению переносимого сообщения, так что при последовательных считываниях ленты мы по существу имеем дело с меняющимся сообщением.

При частотной модуляции также происходит некоторое стирание, но приборы, посредством которых мы читаем ленту, сравнительно нечувствительны к амплитуде и считывают только частоту. Пока лента не сотрется

<sup>1</sup> Taylor G. I., Diffusion by Continuous Movements. Proceedings of the London Mathematical Society, Ser. 2, 20, 196—212 (1921—1922).

<sup>2</sup> Barlow J. S., and Brown, R. M., An Analog Correlator System for Brain Potentials, Technical Report 300. Research Laboratory of Electronics, M. I. T., Cambridge, Mass., 1955.

настолько, что станет совершенно неразборчива, частичное стирание ленты не искажает значительно переносимого сообщения. Поэтому ленту можно читать много раз почти с такой же точностью, как и при первом считывании.

Как можно заключить из природы автокорреляции, среди прочих орудий нам понадобится механизм, задерживающий считывание ленты на регулируемый отрезок времени. Если кусок записи на магнитной ленте, имеющий длительность  $A$ , пропустить через прибор с двумя последовательными считывающими головками, то образуются два одинаковых, но сдвинутых во времени сигнала. Временной сдвиг зависит от расстояния между считывающими головками и от скорости ленты, и его можно менять как угодно. Мы можем обозначить один сигнал через  $f(t)$ , а другой — через  $f(t + \tau)$ , где  $\tau$  — временной сдвиг. Можно образовать произведение этих сигналов, например при помощи квадратических выпрямителей и линейных смесителей, используя тождество

$$4ab = (a + b)^2 - (a - b)^2. \quad (10.01)$$

Произведение можно приближенно усреднить интегрирующей реостатно-емкостной цепью, имеющей большую постоянную времени по сравнению с длительностью  $A$  данной выборки. Полученное среднее пропорционально значению автокорреляционной функции при задержке  $\tau$ . Повторяя эту операцию при различных значениях  $\tau$ , получим набор значений автокорреляции (или, вернее, выборочной автокорреляции над большой временной базой  $A$ ). На рис. 9 показан график одной реальной автокорреляции такого рода<sup>1</sup>. Заметим, что здесь показана лишь половина кривой, так как автокорреляция для отрицательных времен совпадала бы с автокорреляцией для положительных времен, по крайней мере в случае, когда кривая, для которой мы разыскиваем автокорреляцию, является действительной.

Заметим, что подобные автокорреляционные кривые применялись до того много лет в оптике и что прибором, с помощью которого их получали, был интерферометр

<sup>1</sup> Эта работа была выполнена в сотрудничестве с Лабораторией нейрофизиологии Массачусеттской главной больницы и Лабораторией биофизики связи Массачусеттского технологического института.

Майкельсона (рис. 10). Интерферометр Майкельсона посредством системы зеркал и линз делит световой луч на две части, которые посылаются по путям разной длины и затем вновь соединяются в один луч. Различные длины

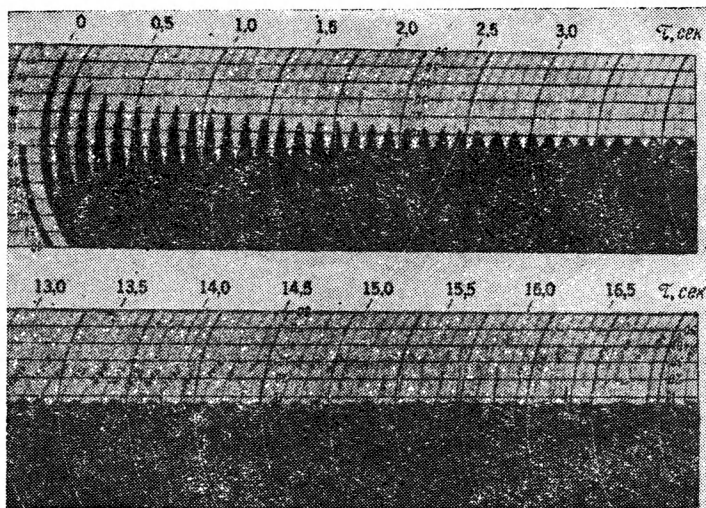


Рис. 9. Автокорреляция.

путей вызывают различные задержки во времени, и результирующий луч будет равен сумме двух отражений входящего луча, которые можно опять обозначить через  $f(t)$  и  $f(t + \tau)$ . Если измерить чувствительным фотометром силу луча, то его показание будет пропорционально квадрату суммы  $f(t) + f(t + \tau)$  и, следовательно, будет содержать член, пропорциональный автокорреляции. Другими словами, резкость интерференционных полос даст нам автокорреляцию (с точностью до линейного преобразования).

Все это неявно содержалось в работе Майкельсона. Мы увидим, что, выполняя преобразование Фурье над интерференционными полосами, интерферометр дает нам спектр мощности света и по существу является спектрометром. Это даже самый точный из известных нам типов спектрометров.

Спектрометр такого типа получил должное признание лишь в последние годы. Мне говорили, что теперь он при-



няют в качестве важного средства прецизионных измерений. Отсюда видно, что методы обработки автокорреляционных записей, которые я сейчас изложу, применимы

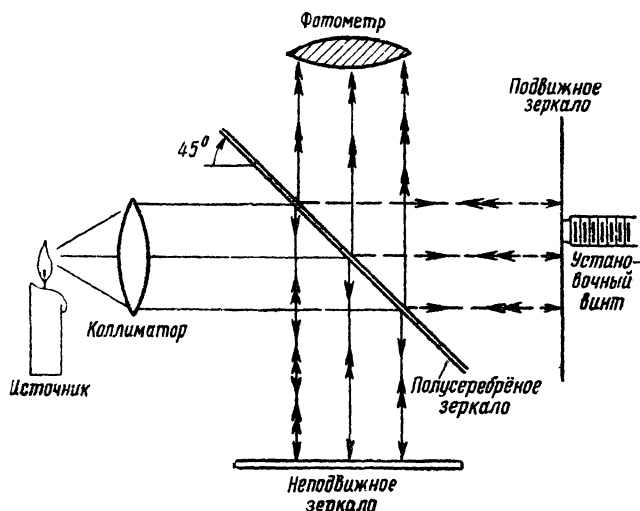


Рис. 10. Интерферометр Майкельсона.

также в спектроскопии и позволяют довести до предела ту информацию, которую может дать спектрометр.

Рассмотрим, каким образом можно получить спектр мозговой волны по автокорреляции. Пусть  $C(t)$  — автокорреляция функции  $f(t)$ . Тогда  $C(t)$  можно записать в виде

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i \omega t} dF(\omega). \quad (10.02)$$

Здесь  $F$  всегда является возрастающей или по меньшей мере неубывающей функцией от  $\omega$ ; мы будем называть ее интегральным спектром функции  $f$ . Вообще говоря, этот интегральный спектр состоит из трех аддитивных частей. Линейчатая часть спектра увеличивается только на счетном множестве точек. После ее исключения остается непрерывный спектр. Этот непрерывный спектр, в свою очередь, равен сумме двух частей: одна из них возрастает только на множестве меры нуль, а другая абсолютно непрерывна и является интегралом положительной интегрируемой функции.

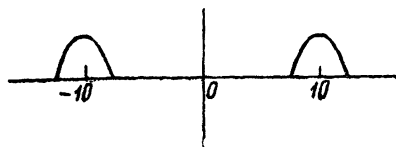
Будем впредь полагать, что первые две части спектра: дискретная часть и непрерывная часть, возрастающая на множестве меры нуль, — отсутствуют. В этом случае можно написать

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i \omega t} \varphi(\omega) d\omega, \quad (10.03)$$

где  $\varphi(\omega)$  — спектральная плотность. Если  $\varphi(\omega)$  принадлежит классу Лебега  $L^2$ , то можно написать

$$\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C(t) e^{-2\pi i \omega t} dt. \quad (10.04)$$

Как будет видно из рассмотрения автокорреляционной кривой мозговых волн, преобладающая часть мощности спектра сосредоточена в окрестности частоты 10 гц. В таком случае  $\varphi(\omega)$  будет иметь форму, подобную следующей диаграмме:



Два пика около 10 и  $-10$  суть зеркальные изображения друг друга.

Существуют разные способы численного выполнения анализа Фурье, включающие применение интегрирующих приборов и численные расчетные методы. В обоих случаях неудобством является то, что главные пики расположены около 10 и  $-10$ , а не около 0. Но существуют способы переноса гармонического анализа в окрестность нулевой частоты, которые весьма сокращают объем работы. Заметим, что

$$\varphi(\omega - 10) = \int_{-\infty}^{\infty} C(t) e^{20\pi i t} e^{-2\pi i \omega t} dt. \quad (10.05)$$

Другими словами, если умножить  $C(t)$  на  $e^{20\pi i t}$ , то наш новый гармонический анализ даст нам одну полосу в окрестности нулевой частоты и другую полосу в окрестно-

сти частоты  $+20$ . Таким образом, если произвести такое умножение и исключить полосу вблизи  $+20$  методами усреднения, равносильными применению волнового фильтра, то мы сведем наш гармонический анализ к гармоническому анализу в окрестности нулевой частоты.

Но

$$e^{20\pi i t} = \cos 20\pi t + i \sin 20\pi t. \quad (10.06)$$

Следовательно, действительная и мнимая части функции  $C(t)e^{20\pi i t}$  равны соответственно

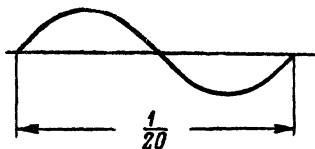
$$C(t) \cos 20\pi t \text{ и } i C(t) \sin 20\pi t.$$

Частоты в окрестности  $+20$  можно исключить, пропустив эти две функции через фильтр нижних частот, что равносильно усреднению их за интервал в одну десятую секунды.

Предположим, что перед нами кривая, у которой большая часть мощности сосредоточена вблизи частоты 10 гц. Умножив эту кривую на косинус или синус от  $20\pi t$ , получим кривую, являющуюся суммой двух составляющих; одна из них ведет себя локально примерно так:



а другая — примерно так:



Усреднив вторую кривую за одну десятую секунды, получим нуль. Усреднив первую кривую, получим половину максимальной высоты. Таким образом, сглаживая  $C(t) \cos 20\pi t$  и  $i C(t) \sin 20\pi t$ , мы соответственно найдем хорошие приближения действительной и мнимой части некоторой функции, у которой все частоты расположены в окрестности нуля, причем эта функция будет иметь такое же распределение частот около нуля, какое одна часть спектра функции  $C(t)$  имела около 10.

Обозначим теперь через  $K_1(t)$  сглаженную величину функции  $C(t) \cos 20 \pi t$ , а через  $K_2(t)$  — сглаженную величину функции  $C(t) \sin 20 \pi t$ . Мы хотим найти

$$\int_{-\infty}^{\infty} [K_1(t) + i K_2(t)] e^{-2 \pi i \omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} [K_1(t) + i K_2(t)] \times \\ \times [\cos 2 \pi \omega t - i \sin 2 \pi \omega t] dt. \quad (10.07)$$

Это выражение должно быть действительным, так как это спектр. Следовательно, оно будет равно

$$\int_{-\infty}^{\infty} K_1(t) \cos 2 \pi \omega t dt + \int_{-\infty}^{\infty} K_2(t) \sin 2 \pi \omega t dt. \quad (10.08)$$

Другими словами, если найти косинус-преобразование от  $K_1$  и синус-преобразование от  $K_2$  и сложить их друг с другом, то мы получим смещенный спектр функции  $f$ . Можно показать, что  $K_1$  будет четной, а  $K_2$  — нечетной функцией. Это значит, что если найти косинус-преобразование от  $K_1$  и прибавить или вычесть синус-преобразование от  $K_2$ , то мы получим соответственно спектр справа и слева от центральной частоты на расстоянии  $\omega$ . Этот метод получения спектра будем описывать как метод гетеродинирования.

Если автокорреляции представляют собой локально почти синусоиды с периодом, скажем, 0,1 сек (как в случае автокорреляции мозговых волн на рис. 9), то вычисления, связанные с методом гетеродинирования, можно упростить. Мы берем нашу автокорреляцию через интервалы  $1/40$  сек. Затем мы берем последовательность значений при 0,  $1/20$ ,  $2/20$ ,  $3/20$  сек и так далее и меняем знак автокорреляции для тех из этих дробей, у которых нечетный числитель. Усредняя эти значения последовательно за достаточно длинный интервал, получим величину, приблизительно равную  $K_1(t)$ . Взяв значения автокорреляции при  $1/40$ ,  $3/40$ ,  $5/40$  сек и так далее с попеременными знаками и проведя такое же усреднение, получим приближенную величину  $K_2(t)$ . Дальнейшая процедура очевидна.

Оправдание этой процедуры следующее. Распределение массы, равное 1 в точках  $2 \pi n$ ,

$$-1 \text{ в точках } (2n + 1) \pi$$

и нулю во всех остальных точках, если его подвергнуть гармоническому анализу, будет содержать косинусную составляющую с частотой 1 и не будет иметь синусной составляющей. Подобно этому распределение массы, равное

$$\begin{aligned} & 1 \text{ при } (2n + 1/2)\pi, \\ & -1 \text{ при } (2n - 1/2)\pi \end{aligned}$$

и нулю во всех остальных точках, будет содержать синусную составляющую с частотой 1 и не будет иметь косинусной составляющей. Оба распределения будут содержать также составляющие с частотами  $N$ , но поскольку исходная анализируемая кривая не содержит или почти не содержит таких частот, эти члены будут незаметны. Это значительно упрощает наше гетеродинирование, так как нам нужно умножать лишь на множители  $+1$  или  $-1$ .

Мы нашли метод гетеродинирования очень полезным при гармоническом анализе мозговых волн, когда имеются в распоряжении лишь ручные средства и когда объем работы становится подавляющим, если выполнять все шаги гармонического анализа без помощи гетеродинирования. Все наши первоначальные исследования по гармоническому анализу мозговых спектров были проделаны методом гетеродинирования. Но поскольку в дальнейшем появилась возможность применять цифровую вычислительную машину, для которой объем вычислений не имеет столь большого значения, многие из последующих исследований по гармоническому анализу были проведены прямыми методами, без гетеродинирования. Тем не менее еще много работы придется делать в местах, где нет цифровых вычислительных машин, так что я не считаю метод гетеродинирования устаревшим в практическом отношении.

Я привожу здесь куски одной конкретной автокорреляции, полученной при наших исследованиях. Ввиду того, что автокорреляция охватывает длинную серию данных, воспроизвести ее полностью неудобно, и мы даем только ее начало, в окрестности  $\tau=0$ , и один из дальнейших кусков.

На рис. 11 представлены результаты гармонического анализа той автокорреляции, часть которой была показана на рис. 9. В этом случае наш результат был получен на быстродействующей цифровой вычислительной

машине<sup>1</sup>, но мы обнаружили хорошее согласие между этим спектром и вычисленным ранее вручную методами гетеродинирования, по крайней мере в окрестности сильной части спектра.

Рассматривая кривую, мы замечаем резкое падение мощности в окрестности частоты 9,05 гц. Точка, в которой спектр, по существу, исчезает, очень резкая и дает объективную величину, которая может быть проверена

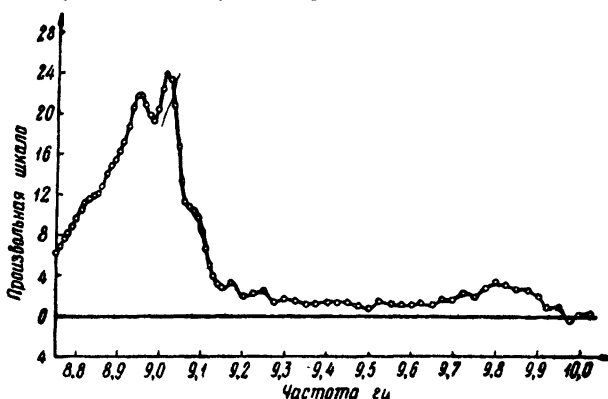


Рис. 11. Спектр.

с гораздо большей точностью, чем любая величина, встречающаяся до сих пор в электроэнцефалографии. Имеются некоторые указания, что в других кривых, которые мы получили, но которые несколько сомнительны в своих подробностях, за этим внезапным падением мощности довольно скоро следует крутой подъем, так что кривая имеет здесь впадину. Независимо от того, действительно ли это так, имеются серьезные основания полагать, что концентрация мощности в пике соответствует отсасыванию мощности из области, где кривая идет низко.

Важно отметить, что в полученном спектре основная часть пика лежит в диапазоне шириной  $\frac{1}{3}$  гц. Любопытно, что в другой электроэнцефалограмме того же субъекта, записанной через четыре дня, ширина пика осталась примерно такой же, и можно с некоторым основанием считать, что форма пика также сохранилась в не-

<sup>1</sup> Использовалась машина IBM-709 в Вычислительном центре Массачусетского технологического института.

которых деталях. Есть также основание полагать, что у других субъектов ширина пика будет другой, быть может меньше. Для вполне удовлетворительной проверки этого необходимы дальнейшие исследования.

Весьма желательно, чтобы исследования, о которых упоминалось в этих гипотезах, были продолжены более точными инструментальными исследованиями, с лучшими приборами, и чтобы благодаря этому гипотезы, высказанные здесь, могли быть окончательно подтверждены или окончательно отвергнуты.

Теперь я рассмотрю вопрос о выборках. Для этого мне нужно ввести некоторые идеи из моих прежних работ по интегрированию в пространстве функций<sup>1</sup>.

С помощью этого аппарата мы сможем построить статистическую модель непрерывного процесса с заданным спектром. Хотя эта модель не воспроизводит в точности процесса образования мозговых волн, она достаточно близка к нему, чтобы доставить статистически значимую информацию о том, какую среднеквадратическую ошибку можно ожидать в спектрах мозговых волн, подобных представленному в этой главе.

Здесь я сформулирую без доказательства ряд свойств некоторой действительной функции  $x(t, \alpha)$ , уже излагавшихся в моей статье по обобщенному гармоническому анализу и в других работах<sup>2</sup>. Действительная функция  $x(t, \alpha)$  зависит от переменной  $t$ , изменяющейся от  $-\infty$  до  $+\infty$ , и от переменной  $\alpha$ , изменяющейся от 0 до 1. Она изображает одну пространственную переменную броуновского движения, зависящую от времени  $t$  и параметра  $\alpha$  статистического распределения. Выражение

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dx(t, \alpha) \quad (10.09)$$

определяется для всех функций  $\varphi(t)$  класса Лебега  $L^2$  в интервале от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Если  $\varphi(t)$  имеет производную, принадлежащую к  $L^2$ , то выражение (10.09) принимает вид

<sup>1</sup> Wiener N., Generalized Harmonic Analysis. Acta Mathematica, 55, 117—258 (1930); Nonlinear Problems in Random Theory, The Technology Press of M.I.T., and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

<sup>2</sup> Wiener N., Generalized Harmonic Analysis, там же.

$$-\int_{-\infty}^{\infty} x(t, \alpha) \varphi'(t) dt \quad (10.10)$$

и может быть получено тогда для всех функций  $\varphi(t)$ , принадлежащих к  $L^2$ , некоторым вполне определенным предельным переходом. Другие интегралы

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n) dx(\tau_1, \alpha) \dots dx(\tau_n, \alpha) \quad (10.11)$$

определяются аналогичным образом.

Основная теорема, которую мы используем, утверждает, что

$$\int_0^1 d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n) dx(\tau_1, \alpha) \dots dx(\tau_n, \alpha) \quad (10.12)$$

можно найти, положив

$$K_1(\tau_1, \dots, \tau_{n/2}) = \Sigma K(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), \quad (10.13)$$

где переменные  $\tau_k$  образуются всевозможными способами путем отождествления всех пар переменных  $\sigma_k$  друг с другом (если  $n$  четно)<sup>1</sup>, и образовав

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau_1, \dots, \tau_{n/2}) d\tau_1 \dots d\tau_{n/2}. \quad (10.14)$$

Если  $n$  нечетно, то

$$\int_0^1 d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n) dx(\tau_1, \alpha) \dots dx(\tau_n, \alpha) = 0. \quad (10.15)$$

Другая важная теорема относительно этих стохастических интегралов утверждает: если  $F\{g\}$  — функционал от  $g(t)$ , такой, что  $F[x(t, \alpha)]$  есть функция, принадлежащая к  $L$  по  $\alpha$  и зависящая только от раз-

<sup>1</sup> Другими словами, переменные  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  разбиваются всеми возможными  $(n-1)(n-3) \dots (1)$  способами на пары, и в каждом разбиении переменные  $k$ -й пары  $(\sigma_{i_k}, \sigma_{j_k})$  отождествляются в одну переменную  $\tau_k$ . Например,

$$\begin{aligned} K_1(\tau_1) &= K(\tau_1, \tau_1) = \Sigma K(\sigma_1, \sigma_2), \\ K_1(\tau_1, \tau_2) &= K(\tau_1, \tau_1, \tau_2, \tau_2) + K(\tau_1, \tau_2, \tau_1, \tau_2) + \\ &+ K(\tau_1, \tau_2, \tau_2, \tau_1) = \Sigma K(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4) \quad \text{и т. д.} \end{aligned} \quad \text{Прим. ред}$$



ностей  $x(t_2, \alpha) - x(t_1, \alpha)$ , то для любого  $t_1$  и почти для всех значений  $\alpha$

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A} \int_0^A F[x(t, \alpha)] dt = \int_0^1 F[x(t_1, \alpha)] d\alpha. \quad (10.16)$$

Это — эргодическая теорема Биркгоффа, доказанная автором<sup>1</sup> и другими.

В упомянутой статье в *Acta Mathematica* было установлено, что если  $U$  — действительное унитарное преобразование функции  $K(t)$ , то

$$\int_{-\infty}^{\infty} UK(t) dx(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t) dx(t, \beta), \quad (10.17)$$

где  $\beta$  отличается от  $\alpha$  только сохраняющим меру преобразованием интервала  $(0, 1)$  в себя.

Пусть теперь  $K(t)$  принадлежит к  $L^2$ , и пусть

$$K(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\omega) e^{2\pi i \omega t} d\omega \quad (10.18)$$

в смысле Планшереля<sup>2</sup>. Рассмотрим действительную функцию

$$f(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t + \tau) dx(\tau, \alpha), \quad (10.19)$$

изображающую отклик линейного преобразователя на броуновский входной сигнал. Она будет иметь автокорреляцию

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t + \tau, \alpha) \overline{f(t, \alpha)} dt, \quad (10.20)$$

которая в силу эргодической теоремы почти для всех значений  $\alpha$  будет равна

<sup>1</sup> Wiener N., The Ergodic Theorem, *Duke Mathematical Journal*, 5, 1—39(1939); также в книге «Modern Mathematics for the Engineer» Е. Ф. Веккенбаха (Ed.), Mc Graw-Hill, New York, 1956, pp. 166—168 (есть русский перевод: «Современная математика для инженеров», под ред Э. Ф. Беккенбаха, М., ИЛ. 1959, стр. 185—215.—*Ред.*)

<sup>2</sup> Wiener N., Plancherel's Theorem, *The Fourier Integral and Certain of Its Applications*, The University Press, Cambridge, England, 1933, pp. 46—71; Dover Publications, Inc., New York.

$$\int_0^1 d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} K(t_1 + \tau) dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} \overline{K(t_2)} dx(t_2, \alpha) = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} K(t + \tau) \overline{K(t)} dt. \quad (10.21)$$

Тогда спектр почти всегда будет равен

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i \omega \tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} K(t + \tau) \overline{K(t)} dt = \\ = \left| \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{-2\pi i \omega \tau} d\tau \right|^2 = |q(\omega)|^2. \quad (10.22)$$

Однако это истинный спектр. Выборочная автокорреляция за время усреднения  $A$  (в нашем случае 2700 сек) будет равна

$$\frac{1}{A} \int_0^A f(t + \tau, \alpha) \overline{f(t, \alpha)} dt = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2, \alpha) \frac{1}{A} \int_0^A K(t_1 + \tau + s) \overline{K(t_2 + s)} ds. \quad (10.23)$$

Получающийся выборочный спектр почти всегда будет иметь среднее по времени

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i \omega \tau} d\tau \frac{1}{A} \int_0^A ds \int_{-\infty}^{\infty} K(t + \tau + s) \overline{K(t + s)} dt = \\ = |q(\omega)|^2. \quad (10.24)$$

Следовательно, выборочный спектр и истинный спектр будут иметь одно и то же среднее значение по времени.

Для многих целей нам интересен приближенный спектр, в котором интегрирование по  $\tau$  производится только в интервале  $(0, B)$ ; в описанном выше частном случае  $B$  равно 20 сек. Напомним, что  $f(t)$  — действительная функция, а автокорреляция — симметрическая

функция. Поэтому интеграл от 0 до  $B$  можно заменить интегралом от  $-B$  до  $B$ :

$$\int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2, \alpha) \frac{1}{A} \int_0^A K(t_1 + \tau + s) \times \\ \times \overline{K(t_2 + s)} ds. \quad (10.25)$$

Эта величина будет иметь среднее значение

$$\int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} K(t + \tau) \overline{K(t)} dt = \\ = \int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 e^{2\pi i \tau \omega} d\omega = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega - u)}{\pi(\omega - u)} d\omega. \quad (10.26)$$

Квадрат приближенного спектра в интервале  $(-B, B)$  будет равен

$$\left| \int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2, \alpha) \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{A} \int_0^A K(t_1 + \tau + s) \overline{K(t_2 + s)} ds \right|^2,$$

а эта величина будет иметь среднее значение

$$\int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau} d\tau \int_{-B}^B e^{-2\pi i u \tau_1} d\tau_1 \frac{1}{A^2} \int_0^A ds \int_0^A d\sigma \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 \times \\ \times [K(t_1 + \tau + s) \overline{K(t_1 + s)} \overline{K(t_2 + \tau_1 + \sigma)} K(t_2 + \sigma) + \\ + K(t_1 + \tau + s) \overline{K(t_2 + s)} \overline{K(t_1 + \tau_1 + \sigma)} K(t_2 + \sigma) + \\ + K(t_1 + \tau + s) \overline{K(t_2 + s)} \overline{K(t_2 + \tau_1 + \sigma)} K(t_1 + \sigma)] =$$

$$\begin{aligned}
&= \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega - u)}{\pi(\omega - u)} d\omega \right]^2 + \\
&\quad + \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_1)|^2 d\omega_1 \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_2)|^2 d\omega_2 \times \\
&\quad \times \left[ \frac{\sin 2\pi B(\omega_1 - u)}{\pi(\omega_1 - u)} \right]^2 \frac{\sin^2 A\pi(\omega_1 - \omega_2)}{\pi^2 A^2(\omega_1 - \omega_2)^2} + \\
&\quad + \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_1)|^2 d\omega_1 \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_2)|^2 d\omega_2 \times \\
&\quad \times \frac{\sin 2\pi B(\omega_1 + u)}{\pi(\omega_1 + u)} \frac{\sin 2\pi B(\omega_2 - u)}{\pi(\omega_2 - u)} \frac{\sin^2 A\pi(\omega_1 - \omega_2)}{\pi^2 A^2(\omega_1 - \omega_2)^2}.
\end{aligned} \tag{10.27}$$

Как известно, если  $m$  обозначает среднее, то

$$m[\lambda - m(\lambda)]^2 = m(\lambda^2) - [m(\lambda)]^2. \tag{10.28}$$

Таким образом, среднеквадратическая ошибка приближенного выборочного спектра будет равна

$$\begin{aligned}
&\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_1)|^2 d\omega_1 \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega_2)|^2 d\omega_2 \frac{\sin^2 A\pi(\omega_1 - \omega_2)}{\pi^2 A^2(\omega_1 - \omega_2)^2} \times} \\
&\quad \times \left( \frac{\sin^2 2\pi B(\omega_1 - u)}{\pi^2(\omega_1 - u)^2} + \frac{\sin 2\pi B(\omega_1 + u)}{\pi(\omega_1 + u)} \times \right. \\
&\quad \left. \times \frac{\sin 2\pi B(\omega_2 - u)}{\pi(\omega_2 - u)} \right).
\end{aligned} \tag{10.29}$$

Но

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 A\pi u}{\pi^2 A^2 u^2} du = \frac{1}{A}. \tag{10.30}$$

Следовательно, интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \frac{\sin^2 A\pi(\omega - u)}{\pi^2 A^2(\omega - u)^2} d\omega \tag{10.31}$$

равен  $1/A$ , умноженной на текущее взвешенное среднее от  $g(\omega)$ . Если усредняемая величина приблизительно постоянна в малом интервале  $1/A$ , что в данном случае является разумным допущением, мы получим как приближенную главную часть среднеквадратической ошибки в любой точке спектра выражение

$$\sqrt{\frac{2}{A} \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin^2 2\pi B(\omega - u)}{\pi^2 (\omega - u)^2} d\omega}. \quad (10.32)$$

Заметим, что если максимум приближенного выборочного спектра лежит при  $u = 10$ , то его величина будет равна

$$\int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin^2 2\pi B(\omega - 10)}{\pi^2 (\omega - 10)^2} d\omega. \quad (10.33)$$

Эта величина при гладкой функции  $q(\omega)$  будет мало отличаться от  $|q(10)|^2$ . Среднеквадратическая ошибка спектра, отнесенная к этой величине как единице измерения, будет равна

$$\sqrt{\frac{2}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{q(\omega)}{q(10)} \right|^2 \frac{\sin^2 2\pi B(\omega - 10)}{\pi^2 (\omega - 10)^2} d\omega} \quad (10.34)$$

и, следовательно, не больше, чем

$$\sqrt{\frac{2}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 2\pi B(\omega - 10)}{\pi^2 (\omega - 10)^2} d\omega} = 2 \sqrt{\frac{B}{A}} \quad (10.35)$$

В рассматриваемом случае она будет равна

$$2 \sqrt{\frac{20}{2700}} = 2 \sqrt{\frac{1}{135}} \approx \frac{1}{6} \quad (10.36)$$

Если допустить реальность явления провала или по крайней мере реальность крутого падения нашей кривой на частоте около 9,05 гц, то в связи с этим можно поставить несколько физиологических вопросов. Три главных вопроса касаются физиологической функции этих наблюдавшихся нами явлений, физиологического механизма, производящего их, и применения, которое можно было бы сделать из этих наблюдений в медицине.

Заметим, что резкая линия частоты эквивалентна точным часам. Так как мозг есть в некотором смысле управляющее и вычислительное устройство, естественно спросить, применяются ли часы в других типах управляющих и вычислительных устройств. И действительно, многие из них имеют часы. Часы применяются в таких устройствах для стробирования<sup>1</sup>. Все такие устройства должны комбинировать большое число импульсов в один импульс. Если эти импульсы передаются просто включением или выключением цепи, синхронность импульсов не имеет большого значения и стробирование не нужно. Однако такой способ переноса импульсов приводит к тому, что вся цепь занимается до того момента, пока не кончится передача сообщения, и значительная часть аппаратуры выводится из действия на неопределенное время. Поэтому желательно, чтобы в вычисленном или управляющем устройстве сообщения переносились комбинированным сигналом включения-выключения. Тогда устройство сразу же освобождается для дальнейшего использования. Достичь этого можно, если сообщения будут запоминаться, чтобы их все можно было послать одновременно, и затем комбинироваться в то время, пока они еще находятся в машине. Здесь и необходимо стробирование, и это стробирование удобно осуществлять при помощи часов.

Хорошо известно, что, по крайней мере в длинных нервных волокнах, нервные импульсы переносятся пиками, форма которых не зависит от того, каким образом они создаются. Комбинирование этих пиков есть функция синаптического механизма. В этих синапсах несколько входящих волокон соединяются с выходящим волокном. Если надлежащая комбинация входящих волокон возбуждается в течение весьма короткого промежутка времени, то возбуждается и выходящее волокно. В такой комбинации действие входящих волокон в некоторых случаях аддитивно: если возбуждается больше известного числа волокон, достигается порог, вызывающий возбуждение выходящего волокна. В других случаях некоторые из входящих волокон производят тормозящее действие, совершенно не допускающее возбуждения или во всяком

---

<sup>1</sup> Стробированием (*gating*) или временной селекцией называется такой способ работы устройства, при котором его цепи реагируют только на сигналы в определенных временных пределах.— *Прим. ред.*

случае увеличивающее порог для других волокон. В обоих случаях время комбинирования должно быть коротким, и если приходящие сообщения не попадают в этот короткий промежуток, они не комбинируются. Поэтому необходим какой-то стробирующий механизм, позволяющий сообщениям прибывать почти одновременно. В противном случае синапс не сможет действовать как комбинирующий механизм<sup>1</sup>.

Желательно, однако, найти дальнейшие доказательства того, что такое стробирование действительно имеет место. Здесь уместно упомянуть работу проф. Дональда Б. Линдсли (психологический факультет Калифорнийского университета, Лос-Анжелос). Он исследовал время реакции при зрительных сигналах. Как хорошо известно, когда приходит зрительный сигнал, возбуждаемые им мышцы действуют не сразу, а с некоторым запаздыванием. Линдсли показал, что эта задержка непостоянна и, по-видимому, состоит из трех частей. Одна из них имеет постоянную длительность, тогда как две другие, по-видимому, равномерно распределены в интервале около  $1/10$  сек. Представляется, что центральная нервная система может воспринимать приходящие импульсы только каждую  $1/10$  сек и импульсы от центральной нервной системы могут приходить к мышцам только каждую  $1/10$  сек. Это является экспериментальным доказательством стробирования, и весьма вероятно, что связь этого стробирования с одной десятой секунды, составляющей приблизительный период альфа-ритма мозга, не случайна.

На этом закончим обсуждение функции центрального альфа-ритма. Возникает вопрос о механизме, создающем этот ритм. Здесь нужно указать, что альфа-ритм может дрейфовать при мигании света. Если свет мигает перед глазом с интервалами, близкими к  $1/10$  сек, то альфа-ритм мозга изменяется и приобретает сильную составляющую того же периода, что и мигание света. Это мигание света, несомненно, вызывает электрическое «мига-

---

<sup>1</sup> Это упрощенная картина происходящего, особенно по отношению к коре головного мозга, так как способность нейронов к действию типа «все или ничего» зависит от их достаточной длины, благодаря которой воспроизведение формы приходящих импульсов в самом нейроне приближается к некоторой асимптотической форме. Однако вследствие малой длины нейронов необходимость синхронизации все же существует, например в коре головного мозга, хотя подробности этого процесса гораздо сложнее.

ние» в сетчатке и, почти наверное,— в центральной нервной системе.

Однако существуют некоторые прямые указания, что чисто электрическое мигание может вызвать действие, подобное действию светового мигания. Такой опыт был проведен в Германии. В комнате был сделан проводящий пол, и к потолку была подвешена изолированная проводящая металлическая пластина. Испытуемые были помещены в комнату, и потолок и пол были соединены с генератором, дающим переменный электрический потенциал. Частота этого потенциала, по-видимому, была близка к 10 *гц*. Действие потенциала на испытуемых было весьма неприятным, что очень похоже на неприятное действие подобного мигания света.

Конечно, эти опыты нужно будет повторить при более контролируемых условиях и снять одновременные электроэнцефалограммы испытуемых. Тем не менее и такие опыты показывают, что электрическое мигание, создаваемое электростатической индукцией, может произвести такое же действие, как мигание света.

Важно отметить, что, если частоту генератора можно изменять импульсами другой частоты, механизм должен быть нелинейным. Действие линейного механизма на колебание данной частоты может дать лишь колебание той же частоты, в общем случае с каким-то изменением фазы и амплитуды. Это перестает быть верно для нелинейных механизмов, которые могут производить колебания с частотами, равными суммам и разностям различных порядков от частоты генератора и частоты возмущения. Такой механизм может вызвать сдвиг частоты, и в рассматриваемом случае этот сдвиг будет иметь характер притяжения. Отнюдь не исключено, что притяжение окажется долговременным или вековым явлением и что в течение коротких промежутков времени система будет оставаться приближенно линейной.

Представим, что мозг содержит ряд генераторов с частотами, близкими к 10 *гц*, и что в некоторых пределах эти частоты могут притягиваться друг к другу. При таких обстоятельствах частоты, вероятно, будут собираться в одну или несколько небольших групп, по крайней мере на некоторых участках спектра. Частоты, собранные в эти группы, должны быть перемещены откуда-то, а потому в спектре образуются провалы, в которых мощ-



ность будет меньшей, чем мы могли бы ожидать в противном случае.

Что такое явление действительно могло иметь место при генерации мозговых волн у индивидуума, чья автокорреляция показана на рис. 9,— на это указывает резкое падение мощности на частотах выше 9,0 гц. Это явление было бы трудно обнаружить при малых разрешающих способностях тех средств гармонического анализа, которыми пользовались прежние авторы<sup>1</sup>.

Чтобы такое объяснение происхождения мозговых волн было приемлемо, мы должны рассмотреть, существуют ли в мозгу предполагаемые генераторы и какова их природа. Профессор Розенблит из Массачусетского технологического института сообщил мне о так называемом явлении остаточного разряда (after-discharge)<sup>2</sup>. Если направить на глаза световую вспышку, то потенциалы коры головного мозга, которые можно коррелировать со вспышкой, не возвращаются сразу к нулю, а проходят через последовательность положительных и отрицательных фаз, прежде чем затухнуть. Форму этого потенциала можно подвергнуть гармоническому анализу, причем обнаруживается, что значительная часть мощности расположена в окрестности 10 гц. В той мере, в какой это выполняется, это по меньшей мере не противоречит изложенной здесь теории самоорганизации мозговых волн. Собираание таких кратковременных колебаний в непрерывное колебание наблюдалось и в других ритмах тела, каков, например, суточный ритм, равный приблизительно 23½ часам, который наблюдается во многих живых организмах<sup>3</sup>. Этот ритм изменениями во внешней среде может быть превращен в 24-часовой ритм дня и

---

<sup>1</sup> Должен сказать, что некоторые указания на существование узкополосных центральных ритмов были получены доктором У. Греем Уолтером из Неврологического института им. Бэрдена в Бристоле (Англия). Мне неизвестны все подробности его методики, но полагаю, что явление, на которое он ссылается, состоит в том, что в полученных им топоскопических изображениях мозговых волн, если идти из центра, лучи, указывающие частоту, ограничены сравнительно узкими секторами.

<sup>2</sup> Barlow J. S., Rhythmic Activity Induced by Photic Stimulation in Relation to Intrinsic Alpha Activity of the Brain in Man. EEG Clin. Neurophysiol., 12, 317—326 (1960).

<sup>3</sup> Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology, vol. XXV (Biological Clocks), The Biological Laboratory, Cold Spring Harbor, Long Island, New York, 1960.

ночи. Биологически не существенно, равен ли естественный ритм живых организмов точно 24 часам, если только он может притягиваться к 24-часовому ритму под действием внешней среды.

Интересным опытом, способным пролить свет на справедливость моей гипотезы о мозговых волнах, могло бы, весьма вероятно, оказаться исследование светляков или других животных, таких, как кузнечики или лягушки, которые могут излучать заметные световые или звуковые импульсы и принимать эти импульсы. Часто высказывалось предположение, что светляки на дереве вспыхивают в унисон, и это видимое явление сводили к оптической иллюзии человека. Я слышал, что у некоторых светляков Юго-Восточной Азии это явление выражено столь резко, что его вряд ли можно приписать иллюзии. Но светляк действует двояким образом: с одной стороны, он излучает более или менее периодические импульсы и, с другой стороны, обладает рецепторами для этих импульсов. Не происходит ли здесь то же самое предполагаемое явление собирания частот?

Для такого исследования необходимы точные записи вспышек, чтобы их можно было подвергнуть точному гармоническому анализу. Кроме того, светляков нужно подвергнуть действию периодического света, например от неоновой импульсной лампы, и определить, будет ли такой свет иметь тенденцию настраивать светляков на свою частоту. Если да, то нам следует попытаться получить точную запись этих спонтанных вспышек и подвергнуть ее автокорреляционному анализу, подобному тому, который был сделан в случае мозговых волн. Хотя я и не осмеливаюсь предсказать исход опытов, которые не ставились, подобное направление исследований кажется мне обещающим и не слишком трудным.

Явление притяжения частот возникает также при некоторых ситуациях, не связанных с живыми организмами. Рассмотрим ряд генераторов переменного тока, частоты которых регулируются регуляторами, приведенными первичным двигателям. Эти регуляторы удерживают частоты в сравнительно узких полосах. Предположим, что выходы генераторов присоединены параллельно к сборным шинам, а с них ток идет на внешнюю нагрузку, которая в общем случае будет подвержена более или менее случайным флуктуациям вследствие

включения и выключения освещения и т. п. Чтобы избежать проблем, связанных с участием человека в коммутации, которые возникают на центральных станциях старого типа, предположим, что включение и выключение генераторов происходит автоматически. Когда генератор доведен до скорости и фазы, достаточно близких к скорости и фазе других генераторов системы, автоматическое устройство подключает его к сборным шинам, а если случайно его частота и фаза отклонятся слишком далеко от надлежащих величин, аналогичное устройство автоматически отключает его.

В такой системе генератор, стремящийся вращаться слишком быстро и, следовательно, иметь слишком высокую частоту, берет большую долю нагрузки, чем ему полагается, а генератор, вращающийся слишком медленно, берет менее своей нормальной доли. В результате частоты генераторов сближаются. Генерирующая система в целом действует как бы под управлением скрытого регулятора, более точного, чем регуляторы отдельных генераторов, и состоящего из набора этих регуляторов вместе с электрическим взаимодействием генераторов между собой. Этим, по крайней мере частично, обусловлена точная регулировка частоты электрических генерирующих систем. Потому-то и возможно применение электрических часов высокой точности.

Ввиду сказанного представляется желательным, чтобы выходы таких систем были исследованы теоретически и экспериментально подобным же образом, как мы исследовали мозговые волны.

С исторической точки зрения интересно, что в ранние времена техники переменного тока делались попытки включать генераторы с постоянной величиной напряжения — того же типа, как применяемые в современных генерирующих системах, — последовательно, а не параллельно. Оказалось, что взаимодействие отдельных генераторов по частоте выражалось в отталкивании, а не в сближении. В результате такие системы были недопустимо неустойчивы, если только вращающиеся части отдельных генераторов не были жестко соединены общим валом или зубчатым механизмом. Напротив, параллельное подключение генераторов к общим сборным шинам оказалось внутренне устойчивым, что позволило соединять

генераторы разных станций в единую автономную систему. Если воспользоваться биологической аналогией, то параллельная система обладала лучшим гомеостазисом, чем последовательная система, и потому выжила, в то время как последовательная система была устранена естественным отбором.

Итак, мы видим, что нелинейное взаимодействие, вызывающее притяжение частот, может создать самоорганизующуюся систему, как то было, например, в случае обсуждавшихся нами мозговых волн и в случае сети переменного тока. Возможность такой самоорганизации отнюдь не ограничивается низкими частотами, свойственными этим двум явлениям. Представьте себе самоорганизующиеся системы на частотном уровне, скажем, инфракрасного света или радиолокационных спектров.

Как было сказано раньше, одна из основных проблем биологии — способ, каким главные вещества, составляющие гены или вирусы, и возможные специфические вещества, вызывающие рак, воспроизводят себя из материалов, лишенных этой специфики, например из смеси аминокислот и нуклеиновых кислот. Обычно дается объяснение, что одна молекула этих веществ действует как шаблон, по которому формируются меньшие молекулы составляющего вещества и объединяются в аналогичную макромолекулу.

По существу, это лишь оборот речи, лишь иной способ описания фундаментального явления жизни, состоящего в том, что новые макромолекулы формируются по образу существующих макромолекул. Как бы не проходил этот процесс, он представляет собой динамический процесс, где действуют какие-то силы или их эквиваленты.

Один вполне возможный способ описания этих сил заключался бы в том, что активный носитель специфики молекулы лежит, возможно, в частотном строении ее молекулярного излучения, значительная часть которого, возможно, располагается в области инфракрасных электромагнитных частот даже ниже. Может оказаться, что специфические вещества вируса при некоторых обстоятельствах излучают инфракрасные колебания, которые обладают способностью содействовать формированию других молекул вируса из неопределенной магмы аминокислот и нуклеиновых кислот. Вполне возможно, что такое

явление позволительно рассматривать как своего рода взаимное притягательное взаимодействие частот. Так как весь этот предмет еще остается *sub judice*<sup>1</sup> и его подробности даже еще не сформулированы, я воздерживаюсь от более конкретных высказываний. Очевидный путь к исследованию данного явления — изучить спектры поглощения и излучения большого количества вирусного вещества, например кристалла мозаичного вируса табака, и затем проследить действие света этих частот на образование дальнейших вирусов от существующего вируса в соответствующей питательной среде. Говоря о спектрах поглощения, я имею в виду явление, которое почти наверное существует; что касается спектров излучения, то нечто подобное мы имеем в явлении флуоресценции.

Для любого такого исследования будет нужен весьма точный метод детального изучения спектров при наличии чрезмерно сильного — в обычном смысле — света с непрерывным спектром. Мы уже видели, что подобная же задача встает перед нами при микроанализе мозговых волн и что математика интерференционной спектрографии по существу такая же, какой мы пользовались здесь. Поэтому я делаю специальное предложение, чтобы возможности этого метода были полностью использованы при изучении молекулярных спектров, и в частности при изучении спектров вирусов, генов и рака. Сейчас преждевременно предсказывать, насколько ценными будут эти методы в чисто биологических исследованиях и в медицине, но я питаю большие надежды, что они могут оказаться чрезвычайно ценными в обеих областях.

---

<sup>1</sup> *Sub judice* — под вопросом (лат.). — *Прим. ред.*

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Акутович (Akutowicz, E. J.) 14  
 Барлоу (Barlow, John S.) 18, 38, 57  
 Беккенбах (Beckenbach, E. F.) 49  
 Бергер (Berger) 37  
 Биркгофф (Birkhoff) 49  
 Бозе (Bose, Amar G.) 12  
 Бойд (Boyd, Constane D.) 17  
 Бразье (Brazier, Mary A. B.) 38  
 Браун (Brown, R. M.) 38  
 Броун (Brown, Robert) 11, 31, 47  
 Ватанабе (Watanabe, S.) 15, 24  
 Винер (Wiener, Norbert) 3—5, 8—10, 14, 24, 27, 30, 47, 49  
 Вольты (Volta) 36  
 Габор (Gabor, D.) 12, 15, 30  
 Гальвани (Galvani) 36  
 Гёте (Goethe) 27  
 Гиббсы, супруги (the Gibbs) 37  
 Джаспер (Jasper) 37  
 Джекобс (Jacobs, William Wy-mark) 28—29  
 Дисней, Уолт (Disney, Walt) 26  
 Дэйвис (Davis, James W.) 18  
 Дэйвис (Davis) 37  
 Икехара (Ikehara, Shikao) 17  
 Каллианпур (Kallianpur) 14  
 Киплинг (Kipling) 25  
 Коперник (Copernicus) 9  
 Котелли (Kotelly, John C.) 18  
 Лагерр (Laguerre) 32  
 Лебер (Lebesgue) 42, 47  
 Ли (Lee, Y. W.) 17  
 Линдсли (Lindsley, Donald B.) 55  
 Мазани (Masani, P.) 14  
 Майкельсон (Michelson) 40  
 Моргенштерн (Morgenstern, O.) 20  
 Мэттьюс (Matthews) 37  
 Наполеон (Napoleon) 21  
 Нейман, фон (Neumann, J. von) 20—22, 30.  
 Нельсон (Nelson) 21  
 Планшерель (Plancherel) 49  
 Птолемей (Ptolemy) 8  
 Рейсбек (Raisbeck, Gordon) 18  
 Робинсон (Robinson, Charles E.) 18  
 Розенблит (Rosenblith, W. A.) 38, 57  
 Стэнли-Джонсы, супруги (the Stanley-Jones) 16  
 Сэмьюэл (Samuel, A. L.) 15, 24  
 Тэйлор (Taylor, Geoffrey I.) 38  
 Уолтер (Walter, W. Grey) 57  
 Уэллс (Wells) 5  
 Фурье (Fourier) 41—42  
 Хаксли (Huxley, Julian) 20  
 Эдисон (Edison) 36  
 Эдриан (Adrian) 37  
 Эйнтховен (Einthoven) 36  
 Эрмит (Hermite) 11, 32

## О Г Л А В Л Е Н И Е

О втором издании «Кибернетики» Н. Винера (от редактора перевода) . . . . .	3
Предисловие Н. Винера ко второму изданию «Кибернетики». . . . .	7
Новые главы . . . . .	19
Глава 9. Об обучающихся и самовоспроизводящихся машинах. . . . .	19
Глава 10. Мозговые волны и самоорганизующиеся системы	34
Именной указатель . . . . .	61

---

**НОРБЕРТ ВИНЕР**  
**Новые главы кибернетики**  
Редактор *В. И. Грознова*  
Техн. редактор *А. А. Свешников*  
Обложка художника *В. Т. Сидоренко*

---

Сдано в набор 29.XI-62 г.	Подписано к печати 20.II-63 г.
Формат 84×108 <sup>1/32</sup>	Печ. листов 3,28
Цена в обложке 23 коп.	Уч.-изд. 3,25
	Тираж 41.000.
	Заказ 8407

---

Типография газеты «Красная звезда»  
Москва. Хорошевское шоссе, 38—40.



**ЦЕНА 23 коп.**