У. Росс Эшби

КОНСТРУКЦИЯ МОЗГА

DESIGN FOR A BRAIN

The origin of adaptive behaviour

W. ROSS ASHBY

M.A., M.D. D.P.M

Director, Burden Neurological Institute;
Late Director of Research, Barnwood House, Gloucester

SECOND EDITION
REVISED

LONDON
CHAPMAN & HALL LTD.
37 ESSEX STREET, W.C.2
1960

У. Росс Эшби

КОНСТРУКЦИЯ МОЗГА

Происхождение адаптивного поведения

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

Ю. И. Лашкевича

ПОД РЕДАКЦИЕЙ

действ. чл. АМН СССР П. К. Анохина

и канд. биол. наук В. А. Шидловского

ПРЕДИСЛОВИЕ

действ. чл. АМН СССР П. К. Анохина

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1962

АННОТАЦИЯ

Книга одного из крупнейших английских ученых, хорошо известного советскому читателю по переведенной на русский язык книге «Введение в кибернетику», посвящена одной из основных проблем кибернетики — анализу механизмов деятельности нервной системы, обеспечивающих приспособительное поведение организма. Перевод сделан со второго издания, полностью переработанного и частично написанного заново.

Предназначена для очень широкого круга читателей — биологов, медиков, физиков, математиков, инженеров.

Редакция биологической литературы

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В последние годы был опубликован ряд переводных книг по вопросам кибернетики. Конечно, эти публикации не исчерпывают всего того, что в действительности печатается за рубежом по кибернетике и по смежным направлениям науки. Достаточно указать, например, что только кибернетическому осмысливанию вопросов нервной системы посвящено в последние годы несколько монографий, в частности монографии Джорджа «Мозг как вычислительная машина», Розенблита «Сенсорные коммуникации», Стенли-Джоунса «Кибернетика естественных систем» и ряд других. В этих книгах рассматривается в основном связь конкретных процессов, протекающих в нервной системе, с теми закономерностями, которые были сформулированы в кибернетике и считаются специфическими для данного научного направления.

Среди этих монографий особое место занимает книга Эшби «Конструкция мозга», необычная для публикаций кибернетического направления. Автор в сущности не рассматривает в ней какой-либо конкретный физиологический механизм и не анализирует его детали с точки зрения кибернетики и ее закономерностей. Его интересует та логическая структура, которая служит как бы матрицей для всякого рода сложных взаимодействий как в пределах организма, так и между организмом и внешней средой в особенности. Сам Эшби называет это «логикой механизма», и действительно, сопоставляя различные этапы развертывания процессов в сложных системах, он раскрывает эту логику и устанавливает неизбежную последовательность процессов там, где изучение деталей могло бы

и не раскрыть этой логической структуры. Эшби хорошо известен советскому читателю по его работам с анализом и конструированием гомеостатической системы (гомеостат Эшби). Однако настоящая книга идет гораздо дальше тех проблем, которые были подняты в его «Кибернетике».

Эшби пытается сейчас понять и проанализировать ту грандиозную разницу между его гомеостатом и реальным организмом, которая обнаруживается в условиях, когда и тот и другой приспосабливаются (адаптируются) к различным изменениям. Он пришел к довольно печальному выводу, что гомеостату, который представляет собой обычную саморегулирующуюся машину, для того чтобы адаптироваться к какому-либо изменению, потребовалось бы много миллиардов лет, тогда как живому организму часто достаточно для этого всего лишь долей секунды. Этот простой математический расчет Эшби и служит основной отправной идеей в изучении и построении приспосабливающегося гомеостата; в сущности, вторая половина книги целиком посвящена раскрытию тех логических структур механизма приспособления, которая отличает организм от механического автомата.

В этом смысле нельзя не отметить, что значительное достоинство книги Эшби состоит именно в том, что в ней намечается вполне определенный путь для анализа сложных и простых «ультрастабильных» систем. Автор постепенно раскрывает свойства этих систем как в отношении их компонентов, так и в отношении отдельных «подсистем» и их взаимодействия. Интересно, что этот анализ ведется не в применении к какому-либо конкретному механическому или биологическому процессу, а именно в плоскости логических взаимоотношений, которые могут служить своего рода таблицей умножения, применяемой в самых разнообразных направлениях.

Практически так оно и есть на самом деле. Выводы Эшби, касающиеся, например, взаимодействия отдельных систем и доминирования одних систем над дру-

гими, применимы в одинаковой степени ко многим системам организма. Так, например, эти заключения можно применить как на уровне подкорковых функций, так и в масштабе межмолекулярных взаимодействий в пределах одной клетки.

Несколько необычный подход Эшби к построению логики механизма несомненно поможет исследователям, особенно молодым, «отточить» острие логического анализа наблюдаемых в организме явлений и научит строить логические структуры там, где, казалось бы, можно обойтись одним прямым аналитическим исследованием.

Вместе с тем необходимо сделать несколько замечаний и о недостатках такого подхода, если он не коррелируется все время с фактами и закономерностями самого биологического процесса. Подходя к анализу этого вопроса с философских позиций, мы могли бы сказать, что закономерности неорганического мира могут влиять и, конечно, влияли на организм на протяжении многих веков, но едва ли можно в этом влиянии видеть только одну механическую и физико-химическую сторону. Надо помнить, что с появлением на Земле первых живых существ радикально изменился самый критерий взаимодействия, центральной проблемой стала проблема выживания, и поэтому все отношения организма к внешнему миру строились, развивались и закреплялись в его структурах под влиянием этого основного критерия.

Любое явление, наблюдаемое в живом организме, можно рассматривать и как физико-химическое и как биологическое. Это накладывает определенную ответственность на наши попытки оценить логику механизмов. Эшби, например, с самого начала отказывается вносить в оценку взаимодействий живых систем с внешним миром критерий полезности в любой его форме. Быть может, для какого-то этапа исследования и следует отрешиться от этого критерия; например, мы можем изучать законы действия световой энергии на элементы сетчатки независимо от того, будет ли этот луч света

в дальнейшем убивать животное или, наоборот, будет стимулировать его приближение к вкусной пище. Но такое игнорирование биологических факторов может быть, конечно, только временным. Как только исследователь делает попытку сформулировать более общие закономерности в жизни организма, он неизбежно сталкивается с тем, что в процессе эволюции развились такие морфологические структуры и такие функциональные свойства мозга, которые обеспечивают наиболее выгодное приспособление животного к окружающему миру; эта «выгодность», конечно, есть не что иное, как наибольшее приближение к оптимальному состоянию организма и наибольшее удаление от условий, опасных для жизни. Следовательно, уже потому только, что на Земле появилась жизнь, неизбежно возник и критерий вредности или полезности факторов внешней среды.

В сущности, и сам Эшби ощущает необходимость внесения чего-то, подобного критерию вредности и полезности, ибо он не раз подчеркивает, что при всяком последовательном изменении состояния системы она имеет тенденцию развиваться в сторону «лучшего». И хотя у Эшби нет определенного и устойчивого мнения по поводу роли этого «лучшего», он все же прибегает к нему несколько раз на протяжении книги для более прочной аргументации поведения живых систем.

Так, например, Эшби довольно подробно разбирает метод «проб и ошибок», совершенно справедливо считая его универсальным путем выработки нового поведения. Однако невольно возникает вопрос: что же направляет эти пробы, какой фактор неуклонно ведет их к максимальному успеху и к отсечению всех тех многочисленных вариаций поведения, которые не привели к необходимому результату?

Эшби не дает ответа на эти принципиальные вопросы, и это, несмотря на исключительную ценность его попытки разработать «логику механизма», показывает, что при объяснении детальных механизмов адаптации необходимо всегда учитывать биологические закономерности.

В самом деле, Эшби полностью игнорирует два крайне важных фактора, направляющих всю линию проб и ошибок и неизбежно приводящих животное к наиболее экономному решению какой-нибудь задачи. Между тем эти факторы — устойчивость врожденных констант организма и подкрепляющий характер жизненно важных стимуляций — определяют и заканчивают каждую линию поведения у такой мультистабильной системы, какой является человек и высшие животные.

Между тем Эшби в самом начале своей книги оговаривает, что ему не нужны для его построения врожденные рефлексы и подкрепления как завершающие биологические факторы. Мне кажется, что, выбрасывая за борт эти два серьезных фактора, без которых вообще не строится никакое поведение, Эшби поставил себя в чрезвычайно трудное положение. Фактически он стремится войти в дом, от которого уже заранее выбросил ключи. Таким же недостатком, на мой взгляд, является и отбрасывание прошлого опыта, или, как его называет Эшби, «заимствованного знания»: ведь любое целенаправленное поведение неизбежно содержит элементы прошлого опыта; оно даже и формироваться-то не будет без учета этого прошлого опыта.

Таким образом, мы видим, что основные погрешности в общей конструкции книги Эшби состоят в необоснованном исключении биологического уровня трактовки предмета. Едва ли можно сомневаться в том, что наличие широкой общебиологической установки необходимо даже в том случае, когда исследователь работает на уровне молекулярных процессов.

В этом смысле интересно привести мнение Эшби о роли наказания как фактора, влияющего на поведение системы. Он пишет: «Понятие наказания несложно, так как оно означает, что те или иные органы чувств или нервные окончания подверглись раздражению, достаточно сильному для того, чтобы вызвать изменение ступенчатых функций в нервной системе...» (стр. 170). Как видно из этой цитаты, Эшби рассматривает наказа-

ние только как механический результат силовых отношений в системе, но вряд ли это рассуждение применимо к таким наказаниям, которые сопровождаются просто отсутствием раздражителя (например, лишение ребенка пирожного). Как мы знаем, с биологической точки зрения такое отсутствие раздражителя имеет не меньшее «наказующее действие», чем, например, реальное физическое наказание.

Такой же недостаток в основных посылках мы видим и в объяснении адаптации к раздражителю, повторяемому несколько раз (привыкание). Эшби объясняет эту адаптацию тем, что система, реагирующая на раздражитель, непрерывно редуцируется и стремится к уменьшению числа своих компонентов, и, следовательно, адаптация возможна только по отношению к такому раздражителю, который не прекращает сразу всю деятельность организма. Конечно, в какой-то степени это рассуждение верно, поскольку системы мозга в самом деле имеют тенденцию реагировать все более и более редуцированно, пока, наконец, их реакция не сведется только к реакции соответствующего рецепторного аппарата и некоторых ближайших нервных образований. Но это правильно лишь для тех раздражителей, которые биологически нейтральны, т. е. не несут за собой более мощных раздражений, опасных для жизни. Если же раздражитель оказывает дальнейшее, скажем болевое, воздействие, то организм к нему не адаптируется; более того, этот раздражитель приобретает все большее и большее значение, создавая у животного или человека адекватную оборонительную реакцию. Следовательно, и в этом случае мы не можем представить себе весь процесс «привыкания» к раздражителю только на уровне уменьшения числа реагирующих элементов нервной системы. Характер этого уменьшения органически зависит от биологического характера всей ситуации, при которой наносится раздражение. Именно здесь очень трудно создать удовлетворительную «логику механизма», не учитывая характера врожденных реакций. Все реакции захватывания или избегания непременно

связаны с непрерывным влиянием какой-то врожденной константной системы организма, и только с учетом этой системы мы можем создать удовлетворительную логическую структуру поведенческого акта.

Книга Эшби получила очень широкое распространение за рубежом, где она пользуется заслуженным успехом. Несомненно, этот успех объясняется тем необычным подходом к раскрытию логики физиологических реакций, которую проводит автор на протяжении всей книги. Книга бесспорно полезна и, несмотря на излишний в ряде случаев механицизм автора, помогает, как это ни странно, именно построению синтетической концепции приспособительных механизмов.

Так, например, детально разбирая как взаимоотношения ультрастабильных систем между собой, так и взаимоотношения подсистем в пределах каждой отдельной системы, Эшби устанавливает ряд правил, которые абсолютно необходимы для всякого исследователя, в особенности физиолога, желающего подняться до оценки места изучаемого явления в системе целого организма.

Здесь я не могу не отметить очень хорошего анализа соотношения «систем с частично постоянной функцией» и «систем с полной функцией». Рассматривая случаи «независимых состояний» в пределах большой системы, автор в сущности намечает канву для понимания организации сложных систем в пределах целого организма. При этом он неизбежно должен был столкнуться с тем, что своеобразие целого организма состоит именно в том, что его «частично постоянные функции» в зависимости от изменения ситуации могут приобретать характер зависимых и независимых функций. По сути дела, мы всегда убеждаемся в этом, изучая различные функции организма. Однако для этого часто требуется отвлечься от реального процесса и посмотреть на функцию с точки зрения функциональной системы как интегративного образования (П. К. Анохин, 1935). Эту перемену формы участия отдельных систем особенно хорошо можно проиллюстрировать на примере роли афферентных импуль-

саций в конструировании какого-либо конечного приспособительного эффекта функциональной системы, например прыжка у лягушки. Этот прыжок есть следствие вполне определенного соотношения частей моторного аппарата, и конечный его эффект состоит в передвижении лягушки на определенное расстояние. Исходя из абсолютного значения афферентных функций, мы должны были бы признать, что во всех своеобразных движениях, например, задних конечностей лягушки афферентные импульсы играют решающую роль на протяжении всего прыжка. Однако, к большому удивлению экспериментатора, перерезка всех задних корешков одной задней конечности и даже обеих задних конечностей очень мало нарушает прыжок. Совершенно очевидно, что «независимость» местных рефлекторных актов в данном моторном акте трансформировалось в зависимость от более высоких стимулов и процессов в большой системе поведенческого акта. Однако эта зависимость функции задней конечности лягушки от более высокой интеграции может немедленно трансформироваться в независимую функцию, если только к одной из конечностей лягушки привязать перед прыжком грузик, требующий дополнительных усилий для совершения прыжка. В этом случае деафферентированная конечность уже не может принять полноценного участия в прыжке (М. Чепелюгина).

Можно привести также пример из области дыхательной функции. Как показали опыты К. Д. Груздева в нашей лаборатории, центральные аппараты системы дыхания получают огромное количество афферентных импульсаций от всех уровней иннервации дыхания и воздухоносных путей. От легких идут импульсации, вызванные растяжением альвеол, от плевры — импульсации, вызванные трением о грудную стенку, от трахеи и слизистой носа — импульсации, возникающие в результате раздражения трахеи и слизистой движущимся воздухом, и т. п.

Исходя только из того, что эти рецепторы посылают в центральную нервную систему афферентные

импульсы, мы должны были бы предположить, что они вносят свою долю в интеграцию эффекторного комплекса дыхания. Однако оказалось, что это не так. Автоматизация дыхательного акта полностью устраняет влияние многих афферентаций, идущих, например, от трахеи, но они немедленно дают знать о себе, как только сила раздражения соответствующей области отклоняется от обычной, т. е. уменьшается или увеличивается. В таких случаях их роль в центральных интегративных образованиях сразу же становится заметнее, и в связи с этим формируется новая интеграция дыхательного акта.

Этот анализ поведения зависимой частной системы в обширной функции организма убеждает нас, что все соотношения и взаимодействия динамичны по своей природе и могут менять как долю своего участия, так и степень своего воздействия на целое.

В случае приведенных выше примеров приемы анализа, применяемые Эшби, исключительно ценны, так как он отправляется только от логических механизмов взаимодействия многочисленных систем, обладающих различными характеристиками.

Надо отдать должное Эшби, что именно в этой части книги он достиг некоторой виртуозности в отношении математически определенной характеристики изменения связи между системами и смены доминирующих потоков информации в пределах системы. Для физиолога, биолога и клинициста особенно важны в этом смысле его аналитические выкладки, касающиеся «логических механизмов» итеративных систем с повторными и поэтапными включениями в деятельность целого организма.

В этом конкретном случае автор затрагивает тот критический период развития жизни на Земле, который определил на протяжении многих тысячелетий приспособленность организма к внешнему миру. Эшби не вскрывает закономерностей, действовавших в этот период, но практически показывает те многочисленные вариации, которые вытекают из нерушимого закона пространственно-временных соотношений в неоргани-

ческом мире. Развитие всей материи происходит последовательно. Это последовательное движение материи коренным образом повлияло на всю эволюцию приспособительных форм живых организмов, но вопрос состоит в том, как эти воздействия складываются в последовательное развитие системной деятельности организма?

Эшби предлагает весьма вероятное решение этого вопроса, строя те логические схемы, которые лежат в основе работы мозга и его приспособительных реакций в отношении внешнего мира. Эта часть книги читается с большим интересом.

Я не могу не отметить, что книга требует некоторого критического подхода, особенно там, где Эшби отказывается от необходимости прибегать в своих рассуждениях к врожденной деятельности и понятию подкрепления и отрицает необходимость привлекать функцию сознания к анализу некоторых сложных ситуаций.

Очень жаль также, что автор, давая определения саморегуляторных приспособлений (стр. 71), не привел наиболее полного и красочного определения саморегуляции, данного И. П. Павловым (1932).

Но вместе с тем четкая, почти математическая постановка вопроса, столь же строгий логический анализ взаимодействий и классификация явлений для различных уровней интеграции — все это несомненно ново, оригинально и принесет большую пользу читателю. Мне хотелось бы подчеркнуть, что эта польза особенно значительна для молодых исследователей, которые находятся в том периоде развития, когда начинает формироваться основная механика научного мышления. Им я особенно рекомендую прочитать книгу Эшби.

Перевод математического приложения сделан Е. В. Майковым. В этом приложении автором допущен ряд неточностей. Некоторые из них отмечены в подстрочных примечаниях или исправлены при переводе без специальных оговорок.

П. Анохин

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

В те дни, когда эта книга была впервые написана, разработка теории информации только еще начиналась. В последующие годы ее вклад в понимание логики механизмов оказался настолько большим, что мне пришлось специально рассмотреть эти проблемы в книге «Введение в кибернетику». Изложенные в ней концепции и методы служат основой для настоящей работы.

Содержание этих двух книг совпадает лишь в небольшой части. Во «Введении в кибернетику» рассмотрены исходные принципы, относящиеся к проблемам механизмов, связи и регулирования; но в ней обсуждаются именно принципы, без сколько-нибудь значительной разработки их приложений. Механизмы трактуются так, как если бы действие их слагалось из небольших дискретных сдвигов,— предположение, при котором их логические свойства очень легко понять. В книге «Конструкция мозга», основанной на тех же принципах, последние упоминаются, однако, лишь постольку, поскольку это нужно для их приложения к частной проблеме происхождения адаптивного поведения. Здесь мы рассматриваем механизмы с непрерывным изменением (как бы результат уменьшения дискретных сдвигов до нуля), так как это условие делает их практические свойства более очевидными. Книга написана как самостоятельное, законченное произведение, хотя в понимании основ читателю, возможно, помогло бы «Введение в кибернетику».

За 8 лет, разделяющих время подготовки двух изданий, понимание механизмов типа головного мозга

неизмеримо продвинулось вперед. В связи с этим книга была переработана, а последние две трети полностью написаны заново. В новом варианте, к моему удовлетворению, изложение получилось гораздо более ясным, простым и убедительным, чем это было раньше.

Изменение плана книги, к сожалению, не позволило сохранить первоначальную нумерацию параграфов, так что соответствия нумерации между двумя изданиями нет. Мне хотелось по возможности избежать этого источника путаницы, но я чувствовал, что требования ясности и простоты должны быть поставлены на первое место.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

В этой книге не рассматриваются все мозговые механизмы, а предлагается решение одной определенной проблемы — вопроса о происхождении уникальной способности нервной системы обеспечивать адаптивное поведение. Эта работа основана на том факте, что поведение нервной системы является адаптивным, и на гипотезе, согласно которой оно в сущности своей «механистично»; далее мы принимаем, что эти два *положения* не непримиримы между собой, и пытаемся, исходя из наблюдаемых фактов, установить, какого рода механизм мог бы вести себя столь отлично от любой построенной до сих пор машины. В других предлагавшихся решениях этой проблемы обычно оставался открытым вопрос о том, не могла ли бы какая-нибудь иная теория так же хорошо соответствовать фактам; я же пытался отыскать необходимые условия, т. е. выяснить, какими свойствами *должна* обладать нервная система, чтобы она могла вести себя «механистически» и в то же время адаптивно.

Для того чтобы дедукция была строгой, необходима должным образом разработанная «логика механизма». До недавнего времени обсуждение механизма того или иного явления велось почти всецело в понятиях, связанных с его конкретным воплощением — механическим, электронным, нейронным и т. д. Эти времена прошли. Ныне существует хорошо разработанная логика чистого механизма, не менее строгая, чем геометрия, и ей предстоит, вероятно, играть такую же фундаментальную роль в понимании сложных биологических

систем, какую геометрия играет в астрономии. Только разработка этой основной логики сделала возможной работу, изложенную в настоящей книге.

Выводы, к которым мы пришли, резюмированы в гл. 18, но, взятые отдельно, они легко могут показаться непонятными или повести к недоразумениям, ибо это резюме предназначено только для того, чтобы выделить ключевые пункты на том пути, который уже пройден читателем. Однако оно могло бы быть полезно и в начале чтения, так как помогло бы читателю отличить главные моменты от второстепенных.

Зная по опыту, какая путаница возникает всякий раз, когда мы пробуем связывать мозговые механизмы с наблюдаемым поведением, я поставил себе цель исключить все, что нельзя сформулировать в математической форме: только это даст нам уверенность в том, что в ходе наших рассуждений мы не будем бессознательно изменять значение понятий, вводить новые предположения или иным образом незаметно запутывать дело. Эта цель оказалась достижимой. Такие понятия, как «организация», «поведение», «изменение поведения», «часть», «целое», «динамическая система», «координация» и т. п.— известные своей расплывчатостью, но необходимые,— получили строгое определение и были сведены в единую систему. Но строгость и последовательность потребовали математической формы, понятной не всякому читателю. Поскольку, однако, основные тезисы опираются, по существу, на обычные логические рассуждения, мне удалось разделить книгу на две части. Основное изложение (гл. 1—18) является нематематическим, но вполне законченным. Приложение (гл. 19—22) содержит математический материал.

Поскольку читателю, вероятно, часто придется сопоставлять сказанное в разных местах книги, главы разделены на параграфы, соответственно обозначаемые в ссылках; например, § 4.5 означает параграф 5 в гл. 4.

Глава 1

ПРОБЛЕМА

1.1. Каким образом мозг обеспечивает адаптивное поведение? В поисках ответа на этот вопрос ученые установили две группы фактов, примирить которые оказалось несколько затруднительным. С одной стороны, физиологи самыми различными способами показали, как велико сходство мозга с машиной — сходство в его зависимости от химических реакций, в его зависимости от совокупности анатомических структур и в той точности и определенности, с которой его составные части действуют друг на друга. С другой стороны, психологи и биологи с полной объективностью подтвердили правильность обычного житейского убеждения, согласно которому поведение живого организма является целенаправленным и приспособленным. Примирить эти две особенности работы мозга очень трудно, и некоторые исследователи доходили до того, что объявляли их несовместимыми.

Мы не будем придерживаться подобной точки зрения. Я надеюсь показать, что система может быть механистической по своей природе и обнаруживать тем не менее адаптивное поведение. Я надеюсь показать, что существенное различие между мозгом и любой до сих пор созданной машиной состоит в том, что мозг широко использует метод, пока еще мало применявшийся в машинах. Наконец, я надеюсь показать, что при использовании этого метода можно сделать поведение машины настолько адаптивным, насколько мы пожелаем, и что этот метод, возможно, позволит объяснить даже адаптивную способность человека.

Однако сначала мы должны более внимательно изучить характер проблемы, к чему мы и приступим в этой главе. В последующих главах будут выработаны более точные понятия, и, когда мы сможем сформулировать проблему с полной четкостью, мы будем недалеки от ее решения.

Рефлекторное поведение и поведение, приобретенное путем научения

1.2. Активность нервной системы можно более или менее четко разделить на два типа. Это, вероятно, лишь упрощенная схема, но она удовлетворит нас, пока мы не выработаем более тонкого подхода к проблеме.

Первый тип — рефлекторное поведение. Оно является врожденным, во всех деталях определено наследственностью, представляет собой (у позвоночных) продукт деятельности преимущественно центров спинного мозга и основания головного мозга и не изменяется заметным образом в результате индивидуального опыта. Второй тип — поведение, приобретенное путем научения. Оно не врожденно, не определяется в деталях наследственностью (подробнее см. § 1.9), представляет собой результат функции коры больших полушарий и резко видоизменяется под влиянием индивидуального опыта организма.

1.3. Первый, рефлекторный, тип поведения не будет предметом нашего анализа. Мы принимаем, что каждый рефлекс осуществляется каким-либо нервным механизмом, физико-химическая природа которого неизбежно обусловливает характерную форму поведения, что этот механизм развивается под контролем генотипа и является врожденным и что форма поведения, зависящая от этого механизма, обычно приспособлена к окружающей животное среде, так как естественный отбор давно уже устранил все неадаптивные вариации. Например, сложная активность, называемая «кашлем», обусловлена, как полагают, особым нервным механизмом, кото-

рый врожден и развивается под влиянием генотипа; его адаптация и усовершенствование определялись тем, что животное, менее способное прочищать свою трахею, имеет меньше шансов на выживание.

Хотя механизмы, лежащие в основе этих рефлекторных форм активности, часто трудны для физиологического изучения и хотя лишь немногие из них исследованы во всех деталях, среди физиологов широко распространено убеждение, что никакой принципиальной трудности здесь нет. Поэтому такое поведение и такие механизмы мы в дальнейшем рассматривать не будем.

1.4. Нас будет интересовать поведение второго типа — то, которое не врождено, а приобретено путем научения. Примеры реакций этого типа многочисленны, и любая небольшая выборка будет выглядеть неполноценной. Однако я должен пояснить, чтó именно я имею в виду, хотя бы лишь для того, чтобы дать критикам определенную мишень для атаки. Поэтому несколько примеров будет все же приведено.

Собаку, выбранную наудачу для опыта с условными реакциями, можно по желанию заставить реагировать на звонок либо с выделением, либо без выделения слюны. Кроме того, после выработки определенной реакции можно без большого труда «научить» собаку реагировать в дальнейшем противоположным образом. Следовательно, слюнная реакция на звонок не может быть обусловлена механизмом с фиксированными свойствами.

Крысу, взятую наудачу для опытов с лабиринтом, можно научить бежать направо или налево, используя лабиринт с подходящим расположением ходов. Однажды приучив крысу поворачивать в одну сторону, можно впоследствии приучить ее поворачивать в другую сторону.

Пожалуй, самые поразительные доказательства того, что животные после дрессировки способны к поведению, которое никак не могло быть врожденным, дает нам цирк. Тюлень в течение нескольких минут балансирует мячом, держа его на носу; один медведь ездит на вело-

синеде, другой катается на роликовых коньках. Смешно было бы предполагать, что эти реакции обусловлены врожденными механизмами, специально выработанными для выполнения этих трюков.

Наиболее разнообразны приобретенные реакции, конечно, у самого человека. Приведем лишь один пример. Если человек смотрит в микроскоп и находит, что объект расположен справа от центра поля, то он приводит его в центр, сдвигая предметное стекло еще дальше вправо. Соотношение между мышечным актом и его зрительно воспринимаемым следствием противоположно обычному. Первоначальная растерянность и неловкость студента показывает, что нет никакого врожденного нервного механизма, готового действовать на основе обратной зависимости. Но после нескольких дней практики вырабатывается координация.

Эти примеры, как и все остальные факты такого рода, показывают, что нервная система способна вырабатывать формы поведения, которые не врождены и не определены в деталях генотипом.

1.5. Приобретенное поведение обладает многими особенностями, но нас будет интересовать главным образом одна из них: когда животные или дети чему-то научаются, их поведение не просто меняется, но меняется обычно к лучшему. Полный смысл выражения «к лучшему» будет обсуждаться в гл. 5, но в более простых случаях улучшение достаточно очевидно. «Ребенок, обжегшись, страшится огня» — после пережитого опыта поведение ребенка по отношению к огню не просто изменилось, а перешло в такую форму поведения, которая *уменьшает* шансы вторично получить ожог. Мы сразу признали бы ненормальным любого ребенка, который в результате приобретенного опыта стремился бы еще быстрее приблизиться к пламени.

Для того чтобы показать, что научение обычно изменяет поведение в сторону большей его полезности, т. е. большей пользы для выживания, понадобилось бы слишком много места. Но в этой вводной главе исчерпывающий обзор не нужен. Мне нужна лишь иллюстра-

ция, достаточная для уяснения смысла. С этой целью приведенные примеры будут рассмотрены по порядку.

Когда мы вырабатываем условный рефлекс, вводя в рот пищу или кислоту, выделение слюны увеличивается. Это изменение благоприятно для животного: оно обеспечивает смачивание прожевываемой пищи или разбавление и вымывание раздражающего вещества. Когда крыса в лабиринте изменяет свое поведение таким образом, что направляется прямо к пище в его противоположном конце, новое поведение лучше прежнего, так как оно быстрее ведет к утолению голода. Поведение циркового животного изменяется от какой-то случайной формы к форме, предусмотренной дрессировщиком, который применяет наказания и награды. Впоследствии закрепляется то поведение, которое уменьшало наказания или увеличивало вознаграждение. В отношении человека предположение о том, что поведение под влиянием опыта обычно изменяется к лучшему, потребовало бы пространного обсуждения. Но в примере с микроскопом очевидно, что вырабатывающиеся позже движения пальцев, приводящие нужный объект прямо в центр поля, лучше первоначальных движений, которые были неэффективны для целей микроскописта.

Теперь можно дать предварительную формулировку нашей проблемы: какие изменения происходят в мозге во время процесса научения и почему поведение обычно изменяется к лучшему? Какого рода механистический процесс мог бы обладать такой же способностью к самоусовершенствованию?

1.6. Нервная система хорошо обеспечена средствами для своего функционирования. Кровь доставляет ей глюкозу, кислород и другие метаболиты, так что свободную энергию она получает в изобилии. Нервные клетки, составляющие эту систему, не только сами обладают исключительной чувствительностью, но снабжены в органах чувств еще более чувствительными устройствами. Каждая нервная клетка благодаря своим разветвлениям может превращать одиночный импульс в множество импульсов, каждый из которых столь же

эффективен, как и тот одиночный импульс, от которого он произошел. За разветвлениями следуют новые и новые разветвления, так что, каким бы малым ни было изменение в каком-либо пункте, вряд ли можно установить предел величины тех изменений или реакций, которые могут последовать по мере распространения эффекта. А благодаря своему контролю над мышцами нервные клетки могут приводить в действие двигатели, обладающие большой механической силой. Таким образом, нервная система обладает почти неограниченными потенциальными возможностями действия. Но решают ли эти возможности нашу проблему? По-видимому, нет. Нас интересует в первую очередь вопрос, почему в процессе научения поведение изменяется к лучшему,— а на этот вопрос нельзя ответить, зная лишь то, что изменение данного поведения состоит в уменьшении или увеличении активности. Рассмотрев изменения энергии до и после научения в примерах, приведенных в § 1.5, мы увидим, что вопрос о «количестве» активности обычно не имеет отношения к делу.

Но есть и более сильные доводы против того, чтобы считать простой рост активности достаточным для решения проблемы: часто увеличение активности представляет собой не безразличный, а положительно вредный фактор. Если динамической системе дана возможность интенсивно действовать и при этом не соблюдается особая предосторожность, то это обычно ведет к разрушению самой системы. Можно привести в движение автомобиль с полным запасом бензина, но, если пустить его без водителя, его активность далеко не будет благотворной: она, вероятно, приведет к саморазрушению автомобиля быстрее, чем если бы он оставался в бездействии. Этот вопрос обсуждается подробнее в § 20.10; здесь можно лишь отметить, что активность, не будучи координирована, имеет тенденцию просто разрушать систему. Каким же образом мозг может успешно функционировать, если его потенции действия являются отчасти потенциями саморазрушения?

Взаимоотношения между частями

1.7. Основной факт, из которого мы исходим, заключается в том, что после процесса научения поведение обычно становится более приспособительным, чем оно было раньше. Поэтому вопрос заключается в следующем: каким свойством должны обладать нейроны, чтобы проявление нейроном этого свойства вело к улучшению поведения всего организма?

Первое предположение состоит в том, что если все нервные клетки — микроскопические биологические единицы — здоровы и нормальны, то и весь организм будет здоровым и нормальным. Это объяснение, однако, приходится отвергнуть как неудовлетворительное. Ведь улучшение в поведении организма часто проявляется в его отношении к факторам, не имеющим аналогии в жизни нейрона. Например, когда в эксперименте с условными рефлексами у собаки, получающей пищу, вырабатывается реакция слюноотделения, поведение следует считать улучшенным потому, что слюна служит для смачивания пищи при жевании. Но в жизни нейрона, поскольку всю свою пищу он получает в растворенном виде, ни «жевание», ни «смачивание» не может иметь никакого непосредственного значения. Или возьмем крысу в лабиринте, которая в результате успешного научения выработала определенный комплекс двигательных реакций; и здесь в процессе научения участвовали нейроны, прочно фиксированные в густой сети глиальных волокон и никогда в своей жизни не двигающиеся.

Наконец, представим себе машиниста, который только что увидел сигнал и рука которого находится на регуляторе дроссельного клапана. Если он видит красный свет, возбуждение от сетчатки должно быть передано через нервную систему таким образом, чтобы клетки в двигательной зоне коры послали импульсы к тем мышцам, активность которых заставит дроссельный клапан *закрыться*. При зеленом же свете возбуждение от сетчатки должно быть передано нервной системой так,

чтобы клетки в двигательной зоне коры в конечном счете заставили дроссельный клапан открыться. При этом осуществлять передачу и обеспечивать безопасность поезда должны нейроны, неспособные составить себе никакого представления о «красном» или «зеленом», о «поезде», «сигнале» или «аварии»! И тем не менее система работает.

Ясно, что одно лишь «нормальное состояние» на уровне нейронов никак не может обеспечить нормального поведения целого организма, так как эти два вида «нормы» не находятся между собой в какой-либо определенной связи.

1.8. Возможно, что в примере с машинистом существует простой механизм, действующий так, что красный свет активирует цепь нервных клеток, ведущую к мышцам, закрывающим дроссельный клапан, тогда как зеленый свет активирует другую цепь, ведущую к мышцам, открывающим дроссельный клапан. Таким образом эффект от цвета сигнала передавался бы через нервную систему по надлежащему пути.

Простота схемы обусловлена тем, что эти две реакции, по нашему предположению, осуществляются двумя независимыми механизмами. Вполне возможно, что такое разделение имеет место в более простых реакциях, но оно не позволяет объяснить ход событий при более сложных актах. В большинстве случаев «правильные» и «неправильные» формы нервной активности одинаково состоят из процессов возбуждения, торможения и т. д., правильность которых (хотя каждый из них сам по себе является физиологическим) определяется *не их собственной природой, а теми отношениями, в которых они находятся с другими процессами.*

Эта зависимость «правильности» того, что происходит в одном пункте нервной системы, от того, что совершается в других пунктах, обнаружилась бы в том случае, если бы машинисту пришлось перейти на другую сторону кабины. Ведь если раньше сгибание руки в локте вело к закрытию дроссельного клапана, то теперь то же действие поведет к его открытию; и

бывшая правильной связь красного или зеленого света с движением на себя и от себя должна быть теперь инверсирована. Итак, местное действие нервной системы нельзя больше считать «правильным» или «неправильным» в абсолютном смысле, и первое простое решение проблемы отпадает.

Другой пример представляет процесс жевания: в нем участвуют язык и челюсти, движения которых должны быть согласованы таким образом, чтобы зубы не прикусывали языка. Никакое движение языка само по себе нельзя рассматривать как абсолютно неправильное, так как движение, которое может оказаться неуместным в момент смыкания зубов, может быть правильным тогда, когда зубы раздвигаются и пищу нужно протолкнуть в промежуток между ними. Поэтому активность нейронов, контролирующих движение языка, нельзя описывать либо как «правильную», либо как «неправильную»: ее правильность можно определить, только сопоставив ее с активностью нейронов, контролирующих движение челюстей; эта характеристика принадлежит не той или другой активности, взятой отдельно, а только совместной активности обеих групп нейронов.

Эти соображения вскрывают главную особенность проблемы. Когда нервная система «научается», ее поведение изменяется к лучшему. Когда мы, однако, рассматриваем ее различные части, мы находим, что поведение одной части нельзя оценить по достоинству, пока мы не знаем поведения остальных частей; а *их* поведение нельзя оценить, пока неизвестно поведение первой части. Все оценки являются, таким образом, *условными* — каждая из них зависит от остальных. Для суждения о том, что «лучше», нет абсолютного, т. е. безусловного, критерия. Но нейрон должен как-то вести себя. Каким же образом активность нейронов координируется так, что поведение целого становится лучше, хотя и не существует абсолютного критерия для этого лучшего, на основе которого мог бы действовать отдельный нейрон?

Точно такая же проблема встает перед конструктором искусственного мозга, желающим, чтобы поведение его механического мозга было адаптивным. Как может этот конструктор установить «правильные» свойства для каждой части, если правильность зависит не от поведения каждой из частей, а от взаимоотношений ее с другими частями? Его задача — создать надлежащую координацию между частями. Мозг делает это автоматически. Какого рода машина способна к *самокоординации*?

В этом и состоит наша проблема. Она будет сформулирована более точно в § 1.17. Но прежде чем мы подойдем к этой формулировке, нужно обсудить некоторые второстепенные вопросы.

Генетический контроль функции мозга

1.9. Отрицая генетический контроль деталей функционирования головного мозга (при адаптации, § 1.4), мы не должны заходить слишком далеко. Генотип, безусловно, играет *некоторую* роль в развитии адаптивного поведения, ибо у разнообразных видов, различающихся в конечном счете только своими генотипами, наблюдаются характерные различия в способности к выработке такого поведения; у насекомых, например, эта способность обычно невелика, тогда как у человека она огромна.

Одна из трудностей в объяснении способности новорожденного ребенка к выработке адаптаций состоит в том, что генотип, определяющий его видовые свойства, содержит около 50 000 генов, которые могли бы контролировать морфологические признаки, тогда как в головном мозгу ребенка находится примерно 10 000 000 000 нейронов, подлежащих этому контролю (а число нервных окончаний, возможно, в 10—100 раз больше). Ясно, что комплект генов не может определять детали всего комплекта нейронов. Очевидно, генотип определяет сравнительно небольшое

число факторов, а затем в результате активного действия этих факторов вырабатывается координация между гораздо большим числом нейронов.

Такая формулировка роли генотипа для нас, пожалуй, пока достаточна; мы вернемся к этому вопросу в § 18.6 (он обсуждается также в § 14/6 «Введения в кибернетику»).

Ограничения в использовании употребляемых понятий

1.10. Во всей этой книге я буду придерживаться определенных основных предположений и определенных методических принципов.

Я буду держаться точки зрения биолога. Для него наиболее важно то, что возраст Земли больше 2 млрд. лет и что естественный отбор все время непрерывно воздействовал на живые организмы с момента их появления. В результате они сейчас высоко специализированы в отношении средств приспособления, и одним из этих средств явилось развитие головного мозга. На протяжении всей этой книги мозг будет рассматриваться просто как орган, выработанный в ходе эволюции в качестве *специализированного средства для выживания.*

1.11. В соответствии с этой точкой зрения мы будем считать, что нервная система, как и живая материя вообще, в основе своей сходна со всякой другой материей. Поэтому мы не будем говорить ни о каком «жизненном» свойстве или тенденции и не будем прибегать ни к какому «Deus ex machina».

Единственное допустимое объяснение поведения любой части системы будет в общей форме сводиться к тому, что ее собственное состояние и условия непосредственно окружающей ее «среды» привели, в согласии с обычными законами природы, к наблюдаемому поведению.

1.12. Мы будем придерживаться метода «операций» как рабочего приема; поэтому будут использованы лишь

те применяемые в психологии понятия, для которых существует объективный эквивалент в неживых системах, и при этом мы будем иметь в виду исключительно объективный смысл каждого понятия. Это связано с требованием, чтобы каждое использованное понятие относилось к тому, что можно продемонстрировать объективным методом. При изучении человека это требование влечет за собой неимоверные трудности, начиная с практических и кончая философскими. Но, поскольку в большинстве случаев речь будет идти о наблюдаемом поведении животных и машин, специфические трудности будут возникать редко.

1.13. Мы не будем прибегать к какому-либо телеологическому объяснению поведения и всегда будем предполагать, что машина или животное в известный момент ведет себя известным образом потому, что ее (или его) физическая природа не допускает в этот момент другого образа действия. Мы никогда не будем объяснять совершение какого-либо действия тем, что позже оно окажется полезным для животного. Любое подобное объяснение, конечно, завело бы нас в замкнутый круг: ведь наша цель в том и состоит, чтобы объяснить происхождение поведения, которое кажется телеологически направляемым.

1.14. Кроме того, мы будем предполагать (за исключением тех случаев, где прямо сказано обратное), что функциональные единицы нервной системы и окружающей среды ведут себя детерминированным образом. При этом я имею в виду, что каждая часть, находясь в определенном состоянии и подвергаясь действию определенных внешних факторов, будет вести себя одним определенным образом. (Такого рода детерминированность проявляют, например, реле и другие части телефонной станции.) Нужно заметить, что мы не предполагаем детерминированности *самых элементарных* единиц, так как это будут атомы, поведение которых, как известно, является в основном недетерминированным; мы принимаем лишь, что реально значимые единицы детерминированы. Действительная

функциональная единица (например, реле, нейрон) обычно по своим размерам гораздо больше атома, так что здесь имеют значение лишь средние свойства многих атомов. Эти средние показатели часто ведут себя детерминированным образом — к ним-то и применимо наше предположение.

Вопрос о том, состоит ли нервная система из частей с детерминированным или стохастическим поведением, еще не решен. В этой книге мы будем предполагать, что их поведение детерминировано. То, что головной мозг способен к ясно выраженному детерминированному функционированию, доказывалось главным образом проявлениями исключительной памяти. Некоторые из доказательств основаны на явлениях гипноза и не настолько ясны для истолкования, чтобы приводить их здесь. Однако Скиннер в опытах на животных получил поразительные данные о том, что нервная система (если внешние условия могут быть точно повторены) способна к полностью воспроизводимому поведению. Используя различное пищевое подкрепление, Скиннер приучил 20 молодых голубей клевать просвечивающую клавишу, когда на нее проецировали сложный световой узор. Затем голубей переносили в помещение, где они обычно жили, и не использовали ни в каких дальнейших экспериментах — они служили только производителями. У небольших групп время от времени проверяли сохранение выработанной реакции.

> «Птицу кормили в слабо освещенном экспериментальном аппарате при отсутствии клавиши в течение ряда дней, и за это время эмоциональные реакции на аппарат исчезали. В день испытания птицу помещали в затемненный ящик. Там была просвечивающая клавиша, но ее не освещали. Никаких реакций не наблюдалось. Когда же на клавишу проецировали световой узор, все подопытные птицы реагировали быстро и энергично... Птица ударяла по клавише не позднее чем через две секунды после появления светового узора, который она не видела целых 4 года, и клевала

в точности то место, с которым прежде было связано пищевое подкрепление».

Таким образом, предположение о детерминированном поведении частей не лишено оснований. Но нам нет надобности предрешать этот вопрос; книга представляет собой попытку руководствоваться предположением о детерминированности, к чему бы оно нас ни привело. Когда оно приведет к очевидной ошибке, тогда и настанет время усомниться в его правильности.

1.15. Чтобы быть последовательными, мы должны к сделанным уже предположениям добавить еще одно — предположение о том, что действительное решение нашей проблемы (как и полагает автор) позволит создать искусственную систему, которая сможет, подобно живому мозгу, обеспечивать адаптивное поведение. Таким образом, если настоящая работа разрешит проблему, то она будет содержать (хотя бы в неявной форме) спецификацию для создания искусственного мозга, способного к самокоординации.

Сознание того, что предложенное решение должно быть подвергнуто такой проверке, обяжет нас к известной дисциплине при введении новых понятий. В особенности это поможет избежать подмены действительного решения чисто словесным «объяснением», ибо в перспективе задача будет содержать требование построить машину, способную *выполнять* то, что мы хотим объяснить.

Сознание

1.16. Согласно сказанному в предыдущих параграфах, мы нигде не должны будем ссылаться на субъективные элементы опыта; и я могу заранее сообщить, что в книге действительно нет таких ссылок. Строгое соблюдение объективного подхода, возможно, иногда будет раздражать читателя и может навлечь на меня обвинение в том, что я игнорирую некоторый существенный фактор. Несколько объяснительных слов помогут избежать недоразумения.

На протяжении всей книги ничего не говорится о сознании и о связанных с ним субъективных элементах по той простой причине, что я ни разу не испытывал необходимости вводить их в наш анализ. Это не удивительно, так как книга касается лишь одного из свойств мозга, притом такого свойства (способности к научению), которое, как давно уже признано, не находится в обязательной зависимости от сознания. Вот пример такой независимости. Если велосипедист хочет повернуть налево, он прежде всего должен повернуть переднее колесо *направо* (иначе он упадет на повороте под действием центробежной силы). Всякий опытный велосипедист делает это движение при каждом повороте, и тем не менее многие велосипедисты, даже после того как они выполнили это движение сотни раз, совершенно не сознают, что они его совершают. Очевидно, прямое участие сознания не требуется для адаптивного научения.

Подобное наблюдение, показывающее, что сознание требуется не всегда, не дает нам права заключить, что сознания не существует. Это прямо противоречит истине, ибо факт существования сознания дан нам прежде всех других фактов. Если я вижу стул — если я сознаю, что вижу его,— то меня можно впоследствии убедить с помощью других данных, что это впечатление было вызвано всего лишь игрой света и тени; может быть, меня удастся убедить, что это было во сне или даже что это была галлюцинация; но не существует таких доводов, которые могли бы убедить меня в том, что само сознание испытанного мной впечатления было ошибочным, т. е. что в действительности я его вовсе не испытывал. Таким образом, осознание своего личного переживания предшествует всем другим видам знания.

Если наличие сознания — самый фундаментальный из всех фактов, то почему он не используется в этой книге? Ответ, я полагаю, состоит в том, что наука имеет дело — и может иметь дело — только с тем, что один человек в состоянии *продемонстрировать* или

доказать другому. Каким бы ярким ни было сознание для его обладателя, мы еще не знаем способа, с помощью которого он мог бы продемонстрировать свое переживание другому лицу. А пока такой способ, или какой-либо его эквивалент, не будет найден, факты сознания не могут быть использованы в научном методе.

Проблема

1.17. Теперь мы должны сформулировать проблему. Позже, когда будут выработаны более точные понятия, можно будет сформулировать ее с большей точностью (§ 5.14).

На протяжении всего нашего анализа нам будет удобно иметь какую-нибудь практическую проблему в качестве «типовой» проблемы, на которой можно было бы конкретизировать общие положения. Я выбрал следующую проблему. Когда котенок впервые приближается к огню, его реакции непредсказуемы и обычно не соответствуют ситуации. Он может войти чуть ли не в самый огонь, может зафыркать на него, может тронуть его лапкой, иногда он пытается обнюхать его или подкрадывается к нему, как к добыче. Однако позже, став взрослым котом, он реагирует по-иному. Он приближается к огню и садится в таком месте, где огонь греет умеренно. Если огонь ослабевает, он придвигается ближе. Если падает горячий уголек, он отскакивает. Теперь его поведение по отношению к огню «адаптивно». Я мог бы взять в качестве типовой проблемы какой-нибудь эксперимент, опубликованный психологической лабораторией, но приведенный пример имеет ряд преимуществ. Он хорошо известен; его особенности характерны для большого класса важных явлений; и, наконец, здесь можно не опасаться, что его сочтут сомнительным в результате выявления какой-нибудь незначительной технической погрешности.

Итак, наше основное предположение состоит в том, что организм имеет «механистическую» природу, что

он состоит из частей, что поведение целого есть результат совместного действия частей, что организмы изменяют свое поведение под влиянием научения и притом таким образом, что их новое поведение лучше приспособлено к окружающей их среде, чем прежнее. Наша проблема состоит в том, чтобы, во-первых, **установить природу изменений, проявляющихся как «научение»**, и, во-вторых, **выяснить, почему такие изменения улучшают адаптацию всего организма.**

Глава 2

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

2.1. В гл. 1 мы неоднократно пользовались понятиями системы, частей в целом, поведения системы и изменений в ее поведении. Это — основные понятия, и им следует дать надлежащие определения. Точное определение на этом этапе имеет величайшее значение, так как всякая неясность здесь скажется на всем последующем анализе; а поскольку нам предстоит вступить в область, где физика соприкасается с психологией, где опыт столетий показал бесчисленные возможности для возникновения путаницы, мы должны будем приступать к делу с особой осторожностью.

То, что известная осторожность необходима, легко показать на примере. Мы неоднократно пользовались понятием «изменение поведения» — скажем, когда котенок перестает трогать раскаленный уголек и начинает избегать соприкосновения с ним. Однако само поведение представляет собой последовательный ряд изменений (например, движений лапы от одной точки к другой). Можем ли мы ясно отличить изменения, составляющие поведение, от изменений, образующих переход от одного поведения к другому? Именно такого рода вопросы подчеркивают необходимость ясности и надежности основ. (Этот вопрос рассмотрен более обстоятельно во «Введении в кибернетику», ч. I; краткое изложение, данное в настоящей книге, будет достаточным для наших целей.)

Мы начнем с предположения, что перед нами некая динамическая система, т. е. нечто такое, что может изменяться с течением времени. Мы хотим исследовать

ее. Мы будем называть ее «машиной», но это слово нужно понимать в самом широком смысле, ибо пока здесь не подразумевается никакого ограничения, кроме того, что система должна быть объективной.

2.2. Поскольку в данной главе нас будут больше интересовать принципы, нежели практическая сторона, мы займемся главным образом построением метода для изучения этой неизвестной машины. Выработанный метод должен будет удовлетворять требованиям, вытекающим из аксиом, изложенных в §§ 1.10—15:

1. Метод должен быть точно определен, и притом в форме рабочего приема (форме операций).
2. Он должен быть (по крайней мере в принципе) одинаково применим к исследованию всех материальных «машин», одушевленных и неодушевленных.
3. Способ получения информации от «машины» должен быть вполне объективным (т. е. доступным для применения всеми исследователями и для демонстрации всем наблюдателям).
4. Источником информации должна служить только сама «машина» — никакой другой источник не допускается.

Разработанная нами форма этого метода может показаться практическому исследователю громоздкой и уступающей по эффективности уже применяемым методам; возможно, что это и так. Но наш метод не рассчитан на то, чтобы конкурировать с многочисленными специальными методами, уже нашедшими применение. Такие методы обычно приспособлены к определенному классу динамических систем — например, к электронным схемам, крысам в лабиринте, растворам реагирующих веществ, автоматическим регуляторам, сердечно-легочным препаратам и т. д. Особенность предлагаемого здесь метода состоит в том, что он должен быть применим к чему угодно; его, так сказать, специализацией должна быть универсальность.

Переменная и система

2.3. Во «Введении в кибернетику», гл. 2, показано, каким образом можно построить основную теорию, не прибегая к анализу состояний (подобно тому как мать может различить три выражения лица своего ребенка и соответственно реагировать на них, не разлагая их на такие элементы, как степень открытия рта, степень сморщнвания носа и т. д.).В этой книге, однако, нас будут интересовать главным образом отношения между частями, и поэтому мы предположим, что наблюдатель приступает к регистрации поведения отдельных частей машины. С этой целью он идентифицирует то или иное число подходящих переменных. **Переменная**— это *измеримая величина, которая в каждый данный момент имеет определенное численное значение.* Например, исследуя старинные часы, можно было бы выбрать следующие переменные: угловое отклонение маятника от вертикали; угловую скорость, с которой движется маятник; угловое положение определенной шестерни; высоту положения гири; показание минутной стрелки на циферблате и, наконец, длину маятника. Если возникнет сомнение, можно ли ту или иную величину принять в качестве «переменной», я буду пользоваться единственным критерием — может ли она быть представлена положением указателя на шкале какого-либо прибора.

Все величины, используемые в физике, химии, биологии, физиологии и объективной психологии, являются переменными в смысле данного нами определения. Например, положение конечности можно численно определить координатами, а движение ее может вызывать перемещение стрелки на шкале определенного прибора. Температура в той или иной точке также может быть выражена числом и зарегистрирована в показателях шкалы. Давление, угол, электрический потенциал, объем, скорость, крутящий момент, сила, масса, вязкость, влажность, поверхностное натяжение, осмотическое давление, удельный вес и даже самое время —

все эти величины и огромное множество других можно определять численно и отмечать на шкалах. Эддингтон прямо говорит по этому поводу: «Весь материал точной науки состоит из показаний стрелок и других подобных показателей; ... Какие бы величины мы (как мы выражаемся) ни «наблюдали», действительная процедура почти всегда заканчивается регистрацией положения какого-либо указателя на градуированной шкале или на ее эквиваленте».

Вопрос о правомерности этого ограничения при изучении живых объектов будет рассмотрен в следующей главе.

Нужно отметить еще один второстепенный момент, так как это понадобится в дальнейшем. Отсутствие чего-либо также всегда можно представить в виде показания на шкале, рассматривая его просто как присутствие в нулевой степени. Так, «неподвижность воздуха» можно рассматривать как нулевую скорость ветра, «темноту» — как свет силой 0 свечей, а введение лекарственного вещества можно представить, указав, что концентрация его в тканях поднялась выше ее обычной величины, равной 0%.

2.4. Нужно иметь в виду, что *всякая реальная «машина» характеризуется бесконечным числом переменных*, из которых почти все, за исключением немногих, по необходимости приходится игнорировать. Например, если бы мы изучали зависимость периода колебания от длины маятника, то нас интересовало бы угловое отклонение его в разные моменты времени, но мы часто игнорировали бы химический состав диска, отражательную способность его поверхности, электропроводность стержня, удельный вес диска, его форму, степень старения сплава, из которого он изготовлен, степень загрязнения его бактериями и т. п. Список несущественных свойств можно было бы увеличивать бесконечно. Сталкиваясь с этим бесконечным числом переменных, экспериментатор должен выбрать для исследования конечное их число. Так он, конечно, и поступает — другими словами, он рассматривает абстрагированную

систему. Например, для одного из своих экспериментов Павлов составил следующую таблицу:

Время, *мин*	Расстояние вторичной катушки, *см*	Раздражаемый участок кожи	Выделение слюны за 30 *сек*, число капель
...	...	...	...

Тем самым он выбрал переменные (время и три другие), которые предстояло определить. Закончив этот опыт, он впоследствии составил другие таблицы, где были добавлены новые переменные или были опущены прежние. Эти новые сочетания представляли собой новые системы.

2.5. Поскольку всякая реальная «машина» имеет бесконечное число переменных, из которых разные наблюдатели (с различными целями) могут, исходя из своих соображений, делать бесконечное число различных выборов, сначала должен быть дан наблюдатель (или экспериментатор); тогда **систему** можно определить как *любую совокупность переменных*, которые он выбирает из числа переменных, свойственных реальной «машине». Таким образом, этот список, составленный наблюдателем, совершенно отличен от комплекса свойств реальной «машины». В этой книге мы всегда будем понимать под «системой» такую абстрактную, а не реальную «машину».

Среди выбранных переменных почти всегда будет «время», поэтому можно было бы думать, что эта переменная должна быть включена в список, определяющий систему. Однако роль времени в данной теории фундаментально отличается от роли всех других переменных. (Это отличие яснее всего видно из канонических уравнений, приведенных в § 19.19.) Опыт показал, что удобнее разделить набор переменных на «систему» и «время». Таким образом, время не следует включать в число переменных системы. Например, в приведенной

выше таблице «систему» *по определению* составляют три переменные, выписанные справа.

2.6. Состояние системы в данный момент — это набор численных значений ее переменных в этот момент.

Например, система из 6 переменных, аналогичная упомянутой в § 2.3, могла бы в какой-то момент иметь состояние:—4°, 0,3 *рад/сек*, 128°, 52 *см*, 42,8 *мин*, 88,4 *см*.

Два состояния одинаковы тогда и только тогда, когда оба численных значения в каждой паре равны между собой и когда во всех парах имеет место равенство.

Метод „операций“ (рабочий прием)

2.7. Когда переменные выбраны, мы должны предположить, что регистрирующий прибор присоединен и экспериментатор готов начать наблюдение. Теперь следует уяснить себе, что́ мы предполагаем относительно его возможностей контролировать систему.

На протяжении всей книги мы будем рассматривать только такой случай, в котором экспериментатор имеет доступ ко всем состояниям системы. Предполагается, что он может контролировать любую переменную по своему усмотрению, т. е. может заставить любую переменную принять любое произвольное значение в любой произвольно выбранный момент времени. Этот постулат ничего не говорит о методах; он требует лишь того, чтобы можно было получить определенные конечные результаты. В большинстве случаев средства для этой цели достаточно очевидны. Возьмем пример из § 2.3; произвольное угловое отклонение маятника можно создать в любое время прямым его перемещением; произвольный угловой момент можно сообщить в любое время при помощи надлежащего толчка; шестерню можно вывести из зацепления и повернуть, гирю поднять, стрелку перевести, а диск маятника опустить.

Повторно контролируя систему в разные моменты времени, экспериментатор может заставить переменную

последовательно принимать любой заданный ряд значений. Таким образом, наш постулат подразумевает, что любую переменную можно заставить изменяться заранее заданным образом.

Некоторые системы нам не подвластны —например, астрономические, метеорологические и те биологические системы, которые доступны для наблюдения, но не для эксперимента. Однако принудительные изменения не являются принципиально необходимыми: экспериментатор просто ждет возникновения желаемого набора величин в ходе естественных изменений системы и принимает этот момент за исходный момент времени. Например, он не может вызвать грозу, но может наблюдать, как на нее реагируют ласточки, если просто подождет, пока гроза не начнется «сама собой» («спонтанно»).

Предположим также (за исключением специально оговоренных случаев), что экспериментатор может полностью контролировать и те переменные, которые не входят в систему, но оказывают на нее влияние. Например, в опыте, к которому относится таблица, приведенная на стр. 40, Павлов мог контролировать не только упомянутые в ней переменные, но и многие другие, которые могли влиять на поведение системы,— скажем, вспышки света, запахи, а также шумы, которые могли бы проникнуть извне.

Предположение о полном контроле сделано потому, что оно, как мы увидим позже (и как было показано во «Введении в кибернетику»), позволяет построить ясную, простую и последовательную теорию. Когда мы рассматриваем более реальные ситуации, в которых не все состояния доступны для наблюдения или не все переменные поддаются контролю, теории получаются запутанными и усложненными, непригодными в качестве *основы*. Все эти более сложные варианты могут быть выведены из основной теории путем введения осложняющих условий, и мы их пока не будем рассматривать.

2.8. **Первичная операция,** извлекающая из «машины» новые сведения, состоит в следующем. Эксперимента-

тор, используя свои возможности контроля, устанавливает (выбирает или создает) определенное состояние в системе. Он также устанавливает (выбирает или создает) условия окружающей систему среды. Затем он выжидает, пока истечет одна единица времени, и наблюдает, в какое состояние приходит система в силу своей собственной динамической природы. Другими словами, он наблюдает переход из определенного состояния при определенных условиях.

Обычно экспериментатору нужно знать переходы из многих состояний при многих условиях. В этом случае он нередко сберегает время, наблюдая цепи последовательных переходов; установив, что после A следует B, он просто смотрит, что произойдет дальше, и таким образом узнает о дальнейшем изменении состояния и т. д.

Определение первичной операции путем такого описания может показаться произвольным и неестественным; но, в сущности, здесь описано только то, что делает каждый экспериментатор, исследуя неизвестную динамическую систему. Приведем несколько примеров.

В химической динамике переменными часто служат концентрации веществ. Вещества, взятые в выбранных концентрациях, приводят во взаимный контакт и с определенного момента позволяют им взаимодействовать в условиях постоянной температуры. Экспериментатор отмечает изменение концентраций с течением времени.

В механическом эксперименте в качестве переменных могут быть взяты положения и количества движения некоторых тел. В определенное время телам, находящимся в заданных положениях, сообщают движение с заданными скоростями и позволяют им взаимодействовать. Экспериментатор регистрирует изменения скоростей и положений с течением времени.

При изучении проведения тепла переменными служат температуры в различных участках нагретого тела. Экспериментатор создает заданное распределение температур и, поддерживая температуру определенных

участков на постоянном уровне, наблюдает последующие изменения ее в других участках.

В физиологии в качестве переменных могут быть выбраны: частота сокращений сердца, интенсивность раздражения экстракардиальных нервов, концентрация адреналина и других медиаторов в крови и т. д. Интенсивность раздражения все время находится под контролем экспериментатора. Вполне вероятно, что вначале ее будут держать на нулевом уровне, а затем увеличат. С определенного момента начнут регистрировать изменения переменных.

В экспериментальной психологии переменными могут быть «число ошибок, сделанных крысой во время опыта с лабиринтом», и «количество удаленного вещества коры больших полушарий». Вторая переменная все время находится под контролем экспериментатора. Экспериментатор приступает к опыту и наблюдает, как изменяется с течением времени первая переменная, когда вторая сохраняет постоянную величину или подвергается определенным изменениям.

2.9. Такое подробное описание того, что может делать и наблюдать экспериментатор, потребовалось потому, что нам (как будет видно из последующих глав) должны быть совершенно ясны *источники знаний экспериментатора*.

Обычно, когда исследователь изучает машину, он широко использует знание, «заимствованное» из прошлого опыта. Когда он видит две сцепленные шестерни, он знает, что они не будут вращаться независимо друг от друга, если даже он не видит их действительно вращающимися. Источник этого знания — прошлый опыт, в котором изучались и непосредственно наблюдались взаимоотношения подобных же пар зубчатых колес. Такое заимствованное знание, разумеется, чрезвычайно полезно, и каждый опытный экспериментатор использует огромный запас его в каждом эксперименте. Тем не менее оно должно быть исключено из любого фундаментального метода хотя бы потому, что оно не вполне достоверно: иногда происходят неожиданности.

Единственный путь к достоверному знанию соотношения между частями новой машины состоит в прямом исследовании этого соотношения.

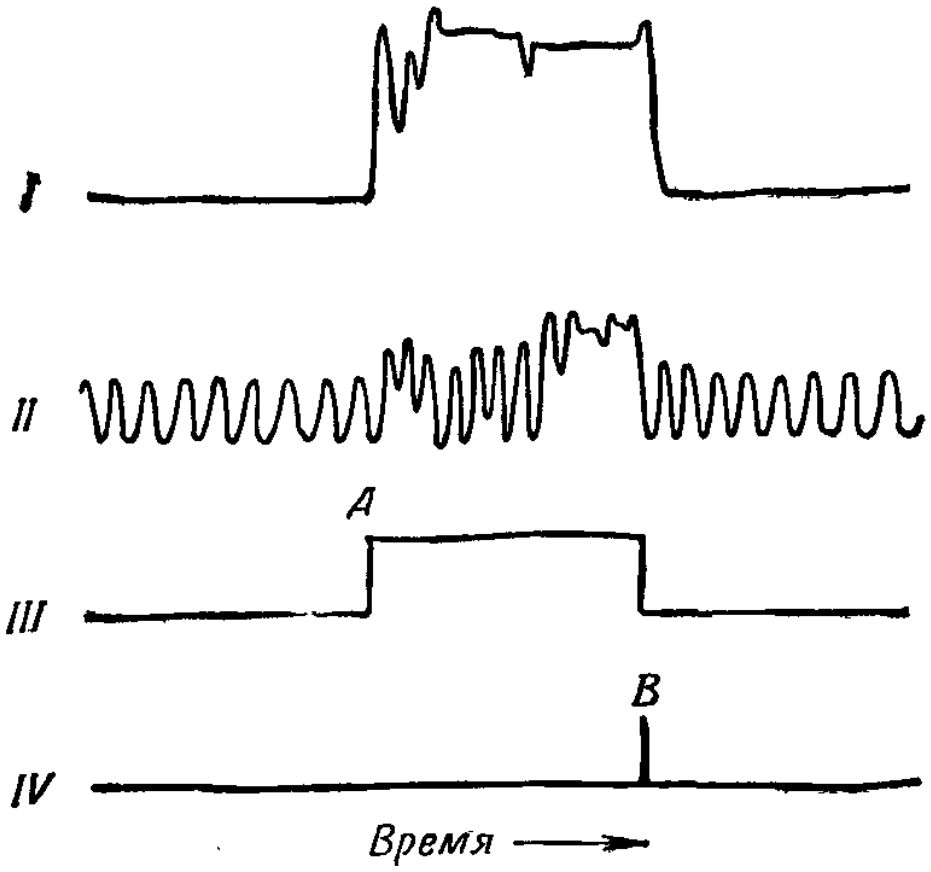
2.10. Хотя отдельная первичная операция дает, по-видимому, мало информации, сила предлагаемого метода состоит в том, что экспериментатор может повторять ее в измененной форме и устанавливать связь различных реакций с разными видоизменениями. Например, после одной первичной операции следующая может быть видоизменена одним из трех способов: можно изменить систему путем включения новых переменных или исключения прежних; можно изменить начальное состояние; или, наконец, можно изменить окружающие условия. Систематически используя эти вариации в разных сочетаниях и группировках, можно связывать между собой различные реакции и устанавливать те или иные зависимости.

Путем дальнейшего планомерного варьирования можно находить взаимоотношения этих зависимостей и устанавливать зависимости второго (следующего) порядка и т. д. Таким способом можно извлекать из «машины» все более и более сложную информацию о ее внутренней организации.

Основное в этом методе состоит в том, что переход является чисто объективным и доступным для демонстрации фактом. Основывая все наши дальнейшие понятия на свойствах переходов, мы можем быть уверены, что и более сложные представления содержат лишь объективные и доступные для демонстрации компоненты. Все наши понятия будут в конечном счете определены в понятиях этого метода. Например, «среда» определена таким образом в § 3.8, «адаптация» — в § 5.3, а «раздражитель» — в § 6.5. Если какое-либо определение пропущено, то только по недосмотру, ибо я полагаю, что такая процедура позволяет дать всем нашим понятиям объективное определение.

Фазовое пространство и поле

2.11. Часто экспериментатор, контролируя внешние условия, позволяет системе переходить от состояния к состоянию, не прерывая этого процесса, так что если он вначале привел ее в состояние A и она перешла в состояние B, то он позволяет ей затем переходить от B к C, от C к D и т. д.



Фиг. 1. Ход событий в опыте с условным рефлексом у овцы (по Лидделу с сотр.).

К левой передней конечности прикреплен электрод, позволяющий производить электрический удар. *I* — положение левой передней стопы; *II* — дыхательные движения овцы; *III* — включение условного раздражителя, которым служил звук зуммера (подъем *A*); *IV* — момент электрического удара (пик *B*).

Форма, или, иначе говоря, **линия поведения**, определяется *последовательностью состояний и временными интервалами между ними.* Первое состояние в той или иной линии поведения мы будем называть **начальным состоянием.** Две линии поведения **идентичны**, если попарно равны все соответствующие состояния и если попарно равны все соответствующие временные интервалы.

2.12. Линию поведения можно регистрировать различными способами.

Пример графического метода записи приведен на фиг. 1. Четыре переменные составляют, по определению, исследуемую систему. Четыре величины, измеренные одновременно в некоторый момент времени, определяют состояние. Последовательность состояний, разделенных соответствующими временны́ми интервалами, образует и определяет линию поведения. Четыре записанные кривые определяют одну линию поведения.

Иногда линию поведения можно определить в понятиях элементарных математических функций. Такая простота удобна, когда она встречается, но на практике это бывает реже, чем можно было бы предполагать на основании знакомства с элементарной математикой. В биологии это редкий случай.

Другая форма записи — табличная форма, пример которой представляет табл. 1. Каждый столбец описывает одно состояние; вся таблица описывает одну линию поведения (другие таблицы могут описывать большее

ТАБЛИЦА 1

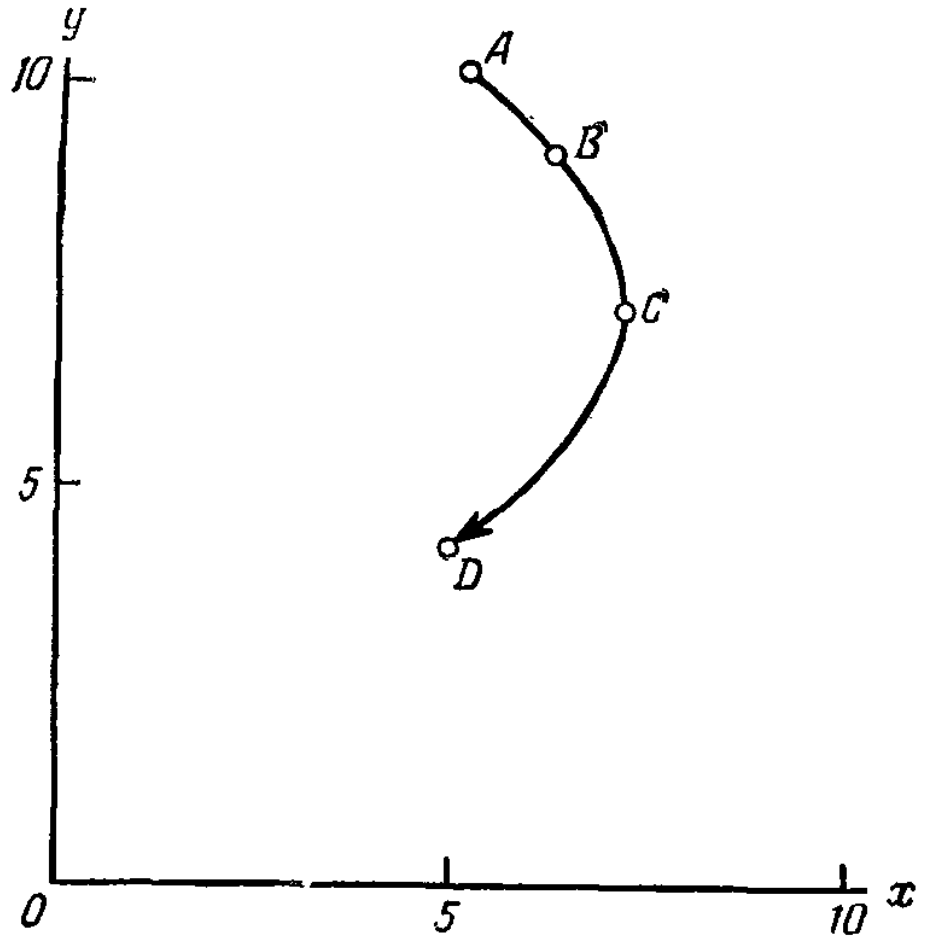
Изменения состава сыворотки крови после введения хлористого аммония

w — величина pH; x — общее содержание оснований; y — концентрация хлорида; z — концентрация бикарбоната (последние три величины в *мэкв/л*)

Переменная	Значения переменных по истечении различных промежутков времени			
	0 *час*	1 *час*	3 *час*	6 *час*
w	7,35	7,26	7,28	7,29
x	156,7	154,6	154,1	151,5
y	110,3	116,7	118,3	118,5
z	22,2	15,3	15,0	14,6

число линий поведения). Состояние в момент времени 0 *час* — начальное состояние.

Табличная форма обладает одним очень важным преимуществом: она содержит только факты и ничего больше. Математические формы часто подсказывают слишком многое: создают представление о непрерывности, которая не доказана, о фиктивных величинах между моментами наблюдений, о точности, которой



Фиг. 2. Графическое изображение поведения системы из двух переменных.

может и не быть. Там, где нет особых оговорок, мы будем предполагать, что все линии поведения первоначально регистрируются в табличной форме.

2.13. Поведение системы можно представить также в фазовом пространстве. С помощью этого метода легко доказываются многие положения, доказательство которых при табличной записи затруднительно.

Если система состоит из двух переменных, ее состояние будет определяться двумя числами. Пользуясь

обычными графическими методами, значения двух переменных можно откладывать на двух осях; тогда два числа определят точку на плоскости. Например, состояние, в котором переменная x имеет значение 5, а переменная y — значение 10, будет представлено точкой A на фиг. 2. **Репрезентативная точка** состояния — это *точка, координаты которой соответственно равны значениям переменных*. Согласно § 2.5, «время» не следует включать в число переменных системы.

Предположим теперь, что система из двух переменных дала линию поведения, записанную в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Линия поведения системы из двух переменных

Время	x	y
0	5	10
1	6	9
2	7	7
3	5	4

Тогда последовательные состояния будут представлены в графической форме точками A, B, C и D (см. фиг. 2). Таким образом, поведение системы соответствует движению репрезентативной точки вдоль определенной линии в фазовом пространстве.

Сравнивая таблицу с графиком, можно найти некоторые точные соответствия. Каждое состояние системы однозначно соответствует определенной точке на плоскости, а каждая точка на плоскости (или на какой-то ее части) — одному из возможных состояний системы. Далее, каждая линия поведения системы однозначно соответствует некоторой линии на плоскости. Если система содержит 3 переменные, график должен быть трехмерным, но каждое состояние и здесь будет соответ-

ствовать точке, а каждая линия поведения — линии в фазовом пространстве. Если число переменных превышает 3, этот метод составления графика становится физически неосуществимым, но соответствия остаются такими же точными независимо от числа переменных.

2.14. Поле[1] **системы представляет собой** ***фазовое пространство, содержащее все линии поведения, найденные путем регистрации переходов системы из всех возможных начальных состояний при данной совокупности внешних условий.***

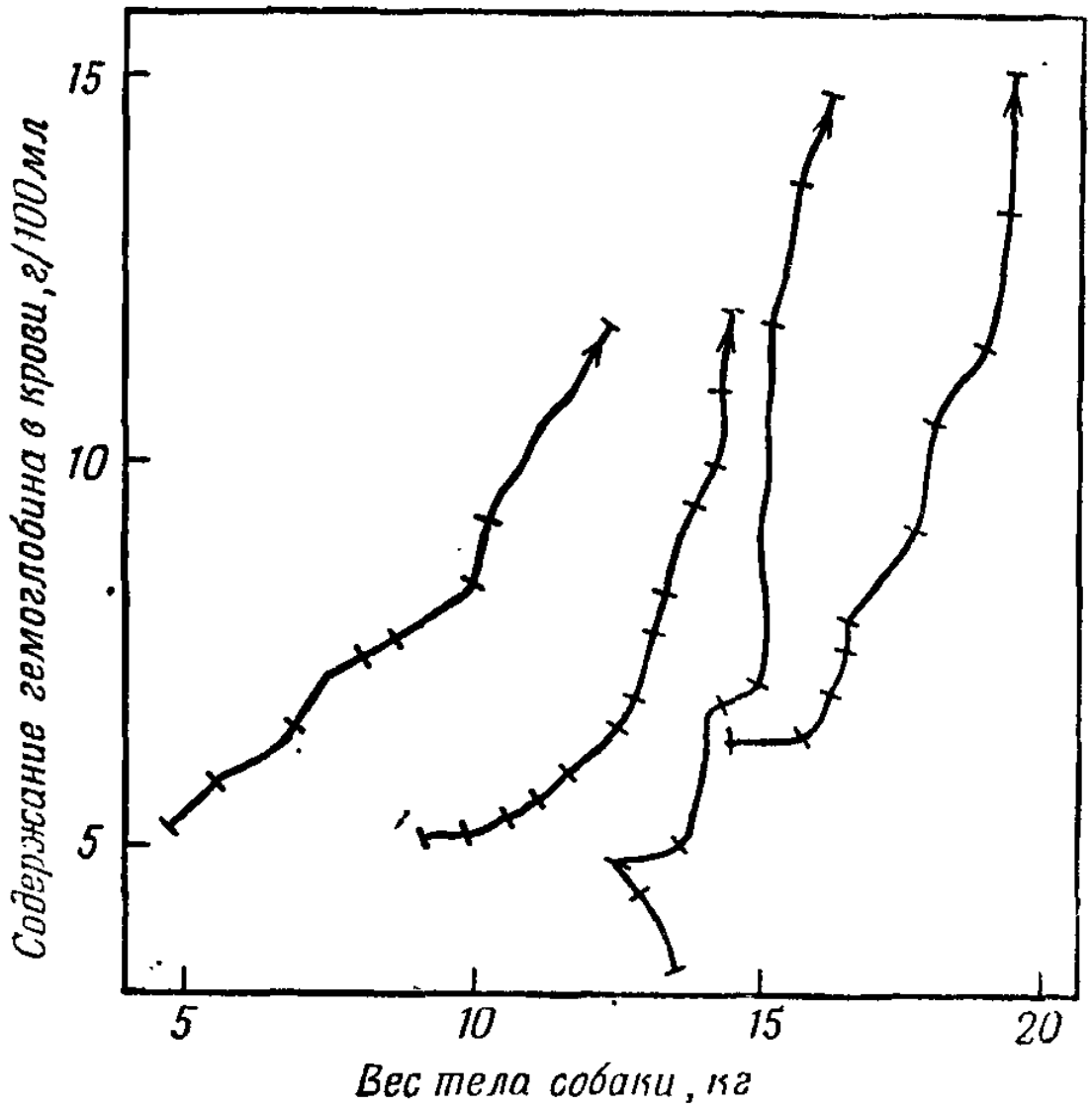
Разумеется, на практике экспериментатор взял бы для испытания только достаточно характерную выборку начальных состояний. Некоторые из них он, вероятно, испытывал бы повторно, желая убедиться, что система дает воспроизводимые линии поведения. Например, в одном опыте, в котором у собак вызывали тяжелую потерю крови, а затем держали их на стандартном пищевом рационе, производилось еженедельное определение веса тела (x) и концентрации гемоглобина в крови (y). Эта система с двумя переменными, исследованная после четырех начальных состояний путем 36 первичных операций, дала поле, показанное на фиг. 3. В дальнейшем мы приведем много других примеров.

Можно заметить, что, в согласии с § 2.9, при определении поля используются исключительно наблюдаемые величины переменных и результаты первичных операций над ними. Таким образом, поле — это совершенно объективное свойство системы.

Понятием «поля» мы будем пользоваться очень широко. Оно определяет характерное поведение системы, заменяя точным представлением неясное описание того, как «действует» или «ведет себя» система,— описание, которое часто удается выразить только словами. Кроме того, поле представляет *все* поведение системы

[1] Для чертежа, подобного тому, который изображен на фиг. 2, требуется какое-то название, особенно ввиду того, что им придется пользоваться на протяжении всей книги. Я надеюсь, что вместо слова «поле» будет найдено более подходящее слово, но пока еще я не нашел его.

(при постоянных условиях), зафиксированное в виде одной неизменяющейся картины, которую можно мыслить себе как некую «единицу». Такие «картины» нетрудно сравнивать и сопоставлять, так что мы легко можем сравнить одно поведение с другим на основе,



Фиг. 3. Поле одной из систем с двумя переменными.

Стрелки показывают направление движения репрезентативной точки; поперечные черточки отмечают положения репрезентативной точки с интервалами в 1 неделю.

которую можно сделать настолько полной и строгой, насколько мы пожелаем.

Возможно, что вначале этот метод покажется читателю необычным. Тот, кто знаком с фазовым пространством в механике, поймет его без труда, но для других читателей, быть может, вначале проще было бы мысленно заменять слово «поле» чем-нибудь вроде слов «типичная форма поведения».

Естественная система

2.15. В § 2.5 система была определена как любая произвольно выбранная совокупность переменных. Мы не можем отказаться от права произвольного выбора, но сейчас пришло время признать, что как наука, так и здравый смысл настаивают на том, что если мы хотим извлечь пользу из изучения системы, сочетание ее переменных должно быть в какой-то мере естественным. Но что значит «естественным»? Этот вопрос неизбежно возникает после того, как мы потребовали отбросить все «заимствованное» знание (§ 2. 9). Если мы рассматриваем только переменные, то находим, что у всякой реальной «машины» число их бесконечно и из них можно составить также бесконечное множество комбинаций; следовательно, нам нужен какой-то критерий для отличения естественной системы от произвольной.

На один критерий сразу укажет нам экспериментатор-практик. Он знает, что если какая-либо активная и относящаяся к изучаемой проблеме переменная оставлена без внимания или контроля, поведение системы становится «капризным» и не может быть воспроизведено по желанию. Это положение легко уточнить. Мы просто изложим формальное представление столетней давности о том, что «машина» — это такая система, поведение которой с необходимостью вытекает из ее внутреннего состояния и окружающих условий. Иными словами, данные внешние условия (или входные величины, т. е. те переменные, которые влияют на систему) и данное состояние *однозначно* определяют, какой переход должен произойти.

Таким образом, формальное определение будет следующим. Берем некоторый комплекс внешних условий (входную величину) C и некоторое состояние S; наблюдаем переход, обусловленный внутренними силами и законами системы; предположим, она переходит к состоянию S_i. Тогда мы выясняем, всегда ли наблюдается переход к S_i при повторениях сочетания C и S; если это так, отмечаем, что переходы, происходящие после C

и S, *инвариантны*. Затем мы изменяем C (или S, или то и другое) и получаем другую пару, скажем C_1 и S_1; точно так же смотрим, будут ли переходы после C_1 и S_1 тоже инвариантными. Продолжаем действовать таким же образом, пока не будут испытаны все возможные пары. Если результат для каждой пары был инвариантным, то система, по определению, представляет собой **машину с входом**. (Это определение согласуется с тем, которое было дано во «Введении в кибернетику».)

В области биологии представление о машине с входом часто встречается в особо простой форме, когда все события (в одном поле) происходят только в одном комплексе внешних условий (т. е. C имеет одинаковую величину для всех линий поведения). Поле в таком случае определяется для изолированной системы. Например, исследователь может подвергать какое-нибудь животное, относящееся к простейшим, действию того или иного вещества в определенной концентрации; затем он наблюдает, без дальнейшего экспериментального вмешательства, всю последующую линию поведения (которая может быть длинной и сложной). Такой случай встречается в биологических системах и будет

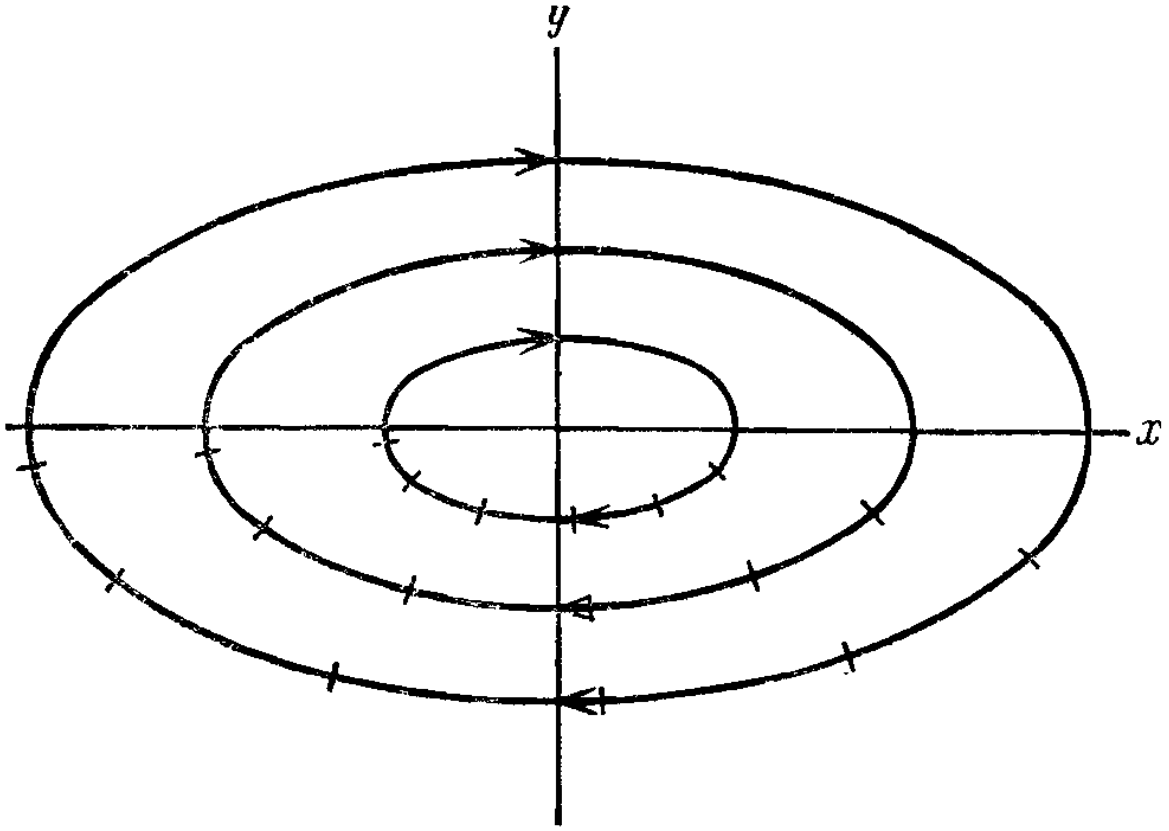
ТАБЛИЦА 3

Линии поведения системы, не определяемой состоянием

Линия	Переменная	Значения переменных по истечении различных промежутков времени			
		0 *сек*	0,1 *сек*	0,2 *сек*	0,3 *сек*
1	x	0	0,2	0,4	0,6
	y	2,0	2,1	2,3	2,6
2	x	—0,2	—0,1	0	0,1
	y	2,4	2,2	2,0	1,8

встречаться в нашей книге настолько часто, что он заслуживает особого названия; подобную систему мы будем называть **системой, определяемой состоянием**[1] (state-determined system).

В качестве иллюстрации рассмотрим табл. 3, в которой записаны две линии поведения системы, *не* определяемой состоянием.



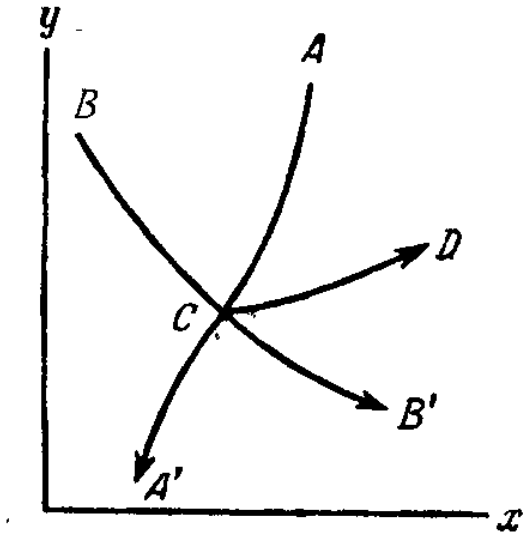
Фиг. 4. Поле простого маятника длиной 20 *см*, качающегося в вертикальной плоскости, при $g = 981$ *см/сек*^{2}.

x — угловое отклонение от вертикали, y — угловая скорость движения. Поперечные черточки отмечают положение репрезентативной точки через каждые 0,1 *сек*. Следует отметить, что репрезентативная точка движется по часовой стрелке.

В первой линии поведения за состоянием $x=0$, $y=2{,}0$ спустя 0,1 *сек* последовало состояние $x=0{,}2$, $y=2{,}1$. Во второй линии состояние $x=0$, $y=2{,}0$ встретилось снова, но через 0,1 *сек* наступило состояние $x=0{,}1$, $y=1{,}8$, а не $x=0{,}2$, $y=2{,}1$. Поскольку два состояния, следующие за $x=0$, $y=2{,}0$, не одинаковы, это не будет система, определяемая состоянием.

[1] В русском переводе книги Эшби «Введение в кибернетику» такие системы называются абсолютными. В математической литературе их обычно называют автономными.— *Прим. ред.*

Хорошо известным примером системы, определяемой состоянием, служит простой маятник, качающийся в вертикальной плоскости. Мы знаем, что две переменные — угол отклонения нити от вертикали (x) и угловая скорость (или количество движения) диска (y) — таковы, что при постоянстве всех остальных условий величина их в данный момент времени полностью



Фиг. 5. Поле системы, представленной на фиг. 65.

определяет последующие изменения обеих переменных (фиг. 4).

Поле системы, определяемой состоянием, обладает характерным свойством: через каждую его точку проходит не более одной линии поведения. Иначе обстоит дело, если система не определяется состоянием. Поле одной такой системы показано на фиг. 5 (система описана в § 19.13). Регулярность этой системы была бы установлена, если бы мы нашли, что из состояния A система всегда переходит в состояние A', а из B — в B'. Но это не система, определяемая состоянием: сказать, что репрезентативная точка покидает пункт C, недостаточно для того, чтобы определить дальнейшую линию поведения, которая может идти к A' или к B'. Даже если линии от A и B всегда идут к A' и B', эта регулярность никак не определяет того, что произойдет, если *начальным* состоянием системы будет C: линия поведения может направиться к D. Если бы это была система,

определяемая состоянием, линии CA', CB' и CD должны были бы совпадать.

2.16. Теперь мы можем вернуться к вопросу о том, что́ мы подразумеваем, когда говорим, что переменные той или иной системы находятся в «естественной» связи. Нам нужно не словесное объяснение, а определение, обладающее следующими свойствами:

1) оно должно иметь форму критерия, разделяющего все системы на два класса;

2) его применение должно быть полностью объективным;

3) результат его применения к типичным и бесспорным случаям не должен расходиться со здравым смыслом.

Как видно из третьего пункта, нельзя ожидать, что предлагаемое определение удастся обосновать в коротком словесном рассуждении: его нужно рассматривать как рабочую гипотезу и пробовать применять; только опыт может показать, ошибочно оно или правильно. (Тем не менее во «Введении в кибернетику», § 13/5, я привел доводы в пользу того, что обладание свойствами системы, определяемой состоянием, неизбежно должно иметь фундаментальное значение для каждого организма, который, подобно человеку, занимающемуся наукой, стремится подчинить себе окружающую среду.)

Наука упорно ищет системы, определяемые состоянием, так как они имеют очень большое значение. Ученые на протяжении ряда столетий руководствовались гипотезой о том, что если дан набор переменных, то исследователь всегда может найти более обширный набор, который, во-первых, включает данные переменные и, во-вторых, образует систему, определяемую состоянием. Большая доля исследовательской работы состоит в попытке идентифицировать такой более обширный набор, ибо, когда набор слишком мал, важные переменные останутся неучтенными и поведение системы будет «капризным». Предположение о существовании такого более обширного набора, по существу, лежит в основе всей науки, но, будучи фундаментальным, оно

редко высказывается в ясной форме. Темпл, однако, говорит о «... фундаментальной предпосылке макрофизики, состоящей в том, что полное знание состояния системы в настоящий момент дает достаточную основу для достоверного определения ее состояния в любой будущий момент времени или ее реакции на любое внешнее воздействие». Лаплас исходил из такого же предположения относительно всей вселенной, когда он утверждал, что если дано ее состояние на какой-либо один момент, то ее будущее можно вычислить. Определение, приведенное выше, придает этому предположению точную форму, в которой его легко будет использовать в последующих главах.

Теперь известно, что это положение неприменимо на атомном уровне. Мы, однако, редко будем обсуждать события на этом уровне; и поскольку это предположение оказалось в основном верным для огромного диапазона макроскопических явлений, мы будем широко им пользоваться.

Стратегия исследования сложных систем

2.17. Читателю могло показаться, что в этой главе обсуждался лишь несколько произвольный набор понятий, и биолог, привыкший к огромному многообразию своего материала, возможно, сочтет эти понятия и определения несоразмерно ограниченными. Поскольку в этой книге выдвигается теория происхождения адаптации, автор должен показать, каким образом теория, разработанная, казалось бы, на такой узкой основе, может быть приемлемой.

В связи с этим мы должны заметить, что бывают теории различного типа. На одном конце ряда находится теория тяготения Ньютона — она одновременно проста, точна и строго верна[1]. Когда возможно

[1] Имеются в виду «обычные» условия, при которых видоизменения, вносимые теорией относительности, практически несущественны.— *Прим. ред.*

такое сочетание, это поистине удача для науки! На другом конце находится теория Дарвина — она не так проста, почти не обладает количественной точностью и верна лишь в известном приближении: простые рассуждения, обычно используемые при ее практическом применении (например, в вопросе о том, каково будет в конечном счете влияние опрыскиваний ДДТ на генетическую конституцию полевой мыши в результате изменения ее пищевых ресурсов), сильно упрощают комплекс событий, происходящих в действительности.

Теория, изложенная в этой книге, относится ко второму типу. Реальные факты, касающиеся головного мозга, настолько сложны и многообразны, что никакая теория, конечно, не сможет приблизиться по простоте и точности к теории Ньютона. Какая же теория тогда нужна нам? Мне кажется, нужно стремиться к тому, чтобы теория была точна в известных избранных случаях, взятых именно потому, что в применении к ним она *может* быть точной. Зная эти «точные» случаи, мы можем уже рассматривать многочисленные случаи, не вполне соответствующие теории, руководствуясь следующим правилом: если мы убедились, что в рядах систем с разными свойствами есть известная непрерывность, то насколько каждая из этих систем близка к какому-либо «точному» случаю, настолько и свойства ее будут близки к свойствам, найденным в этом случае.

Эта научная стратегия не так плоха, как может показаться; фактически она широко применяется во многих науках, обладающих «хорошей репутацией». Например, представления об идеальном газе, о пружине, лишенной массы, об идеально отражающем зеркале, о конденсаторе без утечки свободно используются в физических теориях. Эти идеальные случаи не существуют в действительности, но они тем не менее важны, так как просты и в то же время точны и поэтому служат ключевыми пунктами в общем теоретическом построении.

В таком же духе мы будем придерживаться в этой книге известных идеализированных случаев, которые важны потому, что они поддаются точному определению и не слишком сложны для анализа. В конце концов, возможно, окажется, что ни один из механизмов головного мозга не соответствует *в точности* описанным здесь типам; и все же труд не пропадет даром, если основательное знание «идеальных» форм позволит нам понять работу многих механизмов, сходных с ними лишь в известном приближении.

Глава 3

ОРГАНИЗМ КАК МАШИНА

3.1. В соответствии с § 1.11 мы с самого начала примем, что живой организм по своей природе и протекающим в нем процессам принципиально не отличается от других форм материи. Справедливость этого предположения не будет обсуждаться. Поэтому в настоящей главе речь будет идти только о применении его к сложным особенностям биологических систем.

Характеристика поведения

3.2. Если следовать методу, изложенному в предыдущей главе, то мы должны прежде всего выяснить, в какой мере поведение организма может быть представлено *переменными*, помня о том, что окончательным критерием служит возможность представить его в виде показаний на шкалах приборов (§ 2.3).

Вряд ли будут сомнения в том, что любую отдельную величину, наблюдаемую в живом организме, можно рассматривать, по крайней мере в принципе, как переменную. Все движения тела как целого можно представить координатами, все движения в суставах — углами. Напряжение мышц можно представить тянущим усилием в динах. Движения мышц можно выразить в координатах по отношению к костным структурам или к какой-либо неподвижной внешней точке и, следовательно, их можно регистрировать в численной форме. Деятельность железы может быть выражена интенсивностью секреции. Аналогичным образом можно регистрировать

частоту пульса, артериальное давление, температуру, скорость кровотока, напряжение гладкой мускулатуры и неисчислимое множество других переменных.

При изучении нервной системы наши попытки наблюдать, измерять и регистрировать натолкнулись на большие технические трудности. Тем не менее достигнуто многое. Потенциал действия — одно из важных событий в работе нервной системы — теперь можно измерять и регистрировать. Состояния возбуждения и торможения в центрах еще не поддаются прямой регистрации, но нет оснований думать, что это никогда не удастся.

3.3. Вряд ли кто будет отрицать, что элементарные физико-химические события в живом организме можно описать при помощи переменных. Но, быть может, не все решатся сразу признать, что показания стрелок (и выводимые из них сложные зависимости) достаточны для описания *всех* существенных биологических явлений. Поскольку в дальнейшем будет предполагаться, что они достаточны, я должен показать, как можно свести к этой стандартной форме те многообразные сложные явления, с которыми сталкивается биолог.

Рассмотрим сначала простой случай, с которым мы сталкиваемся тогда, когда событие регистрируют в виде записи «в этот момент был введен стрихнин», или «был включен свет», или «животное получило электрический удар». При такой записи отмечается лишь положительное событие, другое же возможное состояние не упоминается, как будто его не существует. Эту форму записи легко можно преобразовать в числовую форму, пригодную для наших целей, с помощью приема, упомянутого в § 2.3. При регистрации таких событий мы сочли бы, что в первом случае в тканях животного все время находился стрихнин, но содержание его вначале составляло 0 *мг* на 1 *г* ткани, во втором случае свет все время был, но вначале сила его равнялась 0 свечей, а в последнем случае электрический потенциал воздействовал и раньше, но вначале он имел величину 0 *в*. Такой метод в этих случаях не может быть невер

ным, так как он точно определяет тот же самый комплекс объективных фактов. Его преимущество, с нашей точки зрения, состоит в том, что его можно единообразно применять к широкому кругу явлений: переменная все время существует, только изменяет свою величину.

Однако этот прием не устраняет всех трудностей. В физиологии и психологии встречаются случаи, когда переменная, по-видимому, не может быть выражена числом. Например, в одном опыте животному поочередно предъявляли в качестве раздражителей две карточки — коричневую и черную. В таком случае одна из переменных представляла бы собой «цвет» и имела бы две возможные величины. Самый простой способ численно определить цвет — это привести длину волны света; но здесь этот способ неприменим, так как «черный цвет» означает отсутствие света, а «коричневый цвет» в спектре не содержится. Другим примером могло бы служить регулярное применение электрического нагревателя, переключаемого только на «высокую», «среднюю» или «низкую» степени нагрева. Еще один пример — использование в различных электрических приборах контрольной лампы, которая в качестве переменной принимает только две величины — «зажжена» и «не зажжена». В психологических экспериментах часто встречаются более сложные случаи. Например, приведенная на стр. 40 таблица содержит переменную «раздражаемый участок кожи», которая у Павлова принимает лишь две величины: «обычное место» и «новое место». В опытах Павлова весьма обычны еще более сложные переменные. Многие таблицы содержат переменную «раздражитель», принимающую такие значения, как «бульканье воды», «метроном», «вспыхивающий свет». Аналогичная трудность возникает, когда экспериментатор исследует реакцию животного на инъекции токсинов, и в опытах, таким образом, фигурирует переменная «тип токсина», которая может принимать два значения: «дифтерийный токсин, тип gravis» и «дифтерийный токсин, тип mitis». Наконец, изменение может состоять в существенной перестройке всей экспериментальной

ситуации. Например, экспериментатор, желая выяснить действие окружающей обстановки в целом, мог бы исследовать влияние переменной «обстановка опыта», придавая ей поочередно два значения: «в виварии» и «на открытом воздухе». Можно ли представить такие переменные числами?

В некоторых из приведенных случаев переменные, пожалуй, еще можно было бы определить числами путем более или менее сложной спецификации их физической природы. Например, «раздражаемый участок кожи» мог бы быть определен с помощью какой-либо системы координат, отмеченных на коже; три степени нагрева электрического прибора можно было бы представить тремя величинами потребляемой энергии в ваттах. Но этот метод вряд ли применим в остальных случаях; да в этом и нет необходимости. Ведь числа можно употреблять не только в количественном, но и в порядковом значении, т. е. в качестве простых ярлыков, без какой-либо связи с их естественной последовательностью. Такова нумерация дивизий в армии или абонентов телефонной сети; абонент № 4051 не имеет никакого определенного отношения к абоненту № 4052: номер позволяет идентифицировать его, но не устанавливает его отношений к другим абонентам.

Можно показать (§ 21.6), что если переменная принимает несколько значений, не находящихся в каком-либо простом отношении друг к другу, то каждому значению может быть присвоено произвольное порядковое число; и если только числа употребляются систематически на протяжении всего опыта и такое применение их ограничено данным опытом, никакой неясности возникнуть не может. Например, переменной «обстановка опыта» можно присвоить произвольную величину «1», если эксперимент проводится в виварии, и величину «2», если он происходит на открытом воздухе.

Хотя «обстановка опыта» включает огромное число физических переменных, весь их комплекс можно с полным правом рассматривать как одну переменную, если только опыт ставится таким образом, что эти много-

численные переменные на протяжении всего опыта образуют единый комплекс, который может принимать одну из двух форм. Если бы, однако, этот комплекс в опыте расщеплялся — например, если бы мы регистрировали 4 класса результатов:

1) в виварии, летом,
2) в виварии, зимой,
3) на открытом воздухе, летом,
4) на открытом воздухе, зимой,

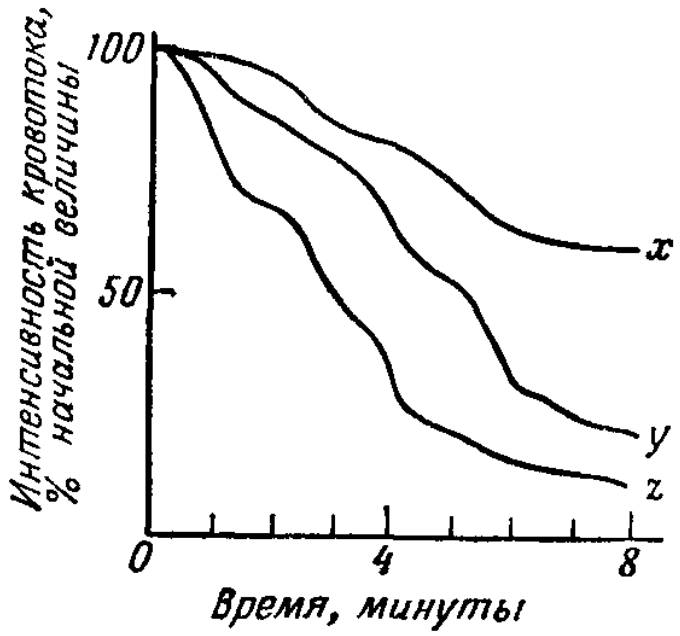
— тогда нам либо пришлось бы присвоить переменной «обстановка опыта» четыре возможных значения, либо мы могли бы счесть, что в опыте действуют две переменные: «место проведения опыта» и «время года», каждая из которых принимает два значения. При этом методе важна не материальная структура технических устройств, а логическая структура эксперимента.

3.4. Но достаточен ли все же этот метод? Можно ли таким способом перевести на язык чисел все более тонкие качества живых организмов? По этому вопросу было много споров, но часть их для нас несущественна, так как нас интересуют только некоторые определенные качества.

Во-первых, мы, собственно, будем иметь дело не с качествами, а с поведением, не с тем, что организм чувствует или думает, а с тем, что он делает. Благодаря исключению всех субъективных аспектов (§ 1.16) отпадает обсуждение наиболее тонких качеств, а то, что мы рассматриваем лишь внешнее поведение, необычайно облегчает спецификацию поведения с помощью переменных. Во-вторых, когда читатель, не знакомый с математикой, полагает, что есть какие-то сложные количества (сущности или явления), которые нельзя адекватно представить числами, он склонен думать о представлении их с помощью одной переменной. Использование многих переменных позволяет, однако, анализировать системы значительной сложности. Например, такую сложную систему, как «погода на территории Англии», которая не может быть адекватно представлена одной переменной, можно, пользуясь большим числом

переменных, отразить настолько адекватно, насколько мы пожелаем.

3.5. Приведем два примера, иллюстрирующих метод спецификации поведения системы с помощью переменных. Эти примеры сами по себе мало интересны, но они показывают, что метод точен и что он может быть распространен на любую область, не теряя при этом точности.



Фиг. 6. Влияние кровопотери на скорость кровотока через нижнюю полую вену (x), мышцы конечности (y) и кишечник (z) (по Рейну).

Первый пример взят из физиологического эксперимента. У собаки вызывали непрерывную потерю крови со скоростью 1% (по отношению к весу тела) в 1 *мин*. Регистрировались три переменные:

x — интенсивность кровотока через нижнюю полую вену,

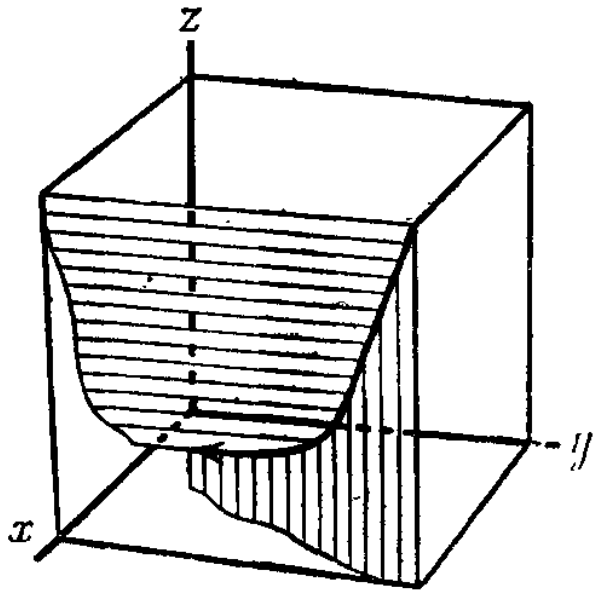
y — интенсивность кровотока через мышцы конечности,

z — интенсивность кровотока через кишечник.

Изменение переменных во времени показано на фиг. 6. Можно видеть, что оно обнаруживает характерную особенность: кровоток через конечности и кишечник падает сильнее, чем кровоток в нижней полой вене, и это различие типично для реакции организма на кровопотерю.

Использование *нескольких* переменных позволило наглядно выявить *характерную картину* реакции.

Найденным изменениям соответствует линия поведения, показанная на фиг. 7. Если бы линия поведения пошла по иному направлению, это изменение соответствовало бы изменению картины реакции организма на потерю крови.



Фиг. 7. Фазовое пространство и линия поведения для данных, представленных на фиг. 6.

Вторым примером послужат данные о некоторых углах, измеренных по кинематографической записи движений человека. Его тело перемещалось вперед, но все время сохраняло вертикальное положение. Четыре переменные таковы:

w — угол между правым бедром и вертикалью,

x — угол между левым бедром и вертикалью,

y — угол между правым бедром и правой большеберцовой костью,

z — угол между левым бедром и левой большеберцовой костью.

Величины углов w и x считаются положительными, когда колено выдвинуто вперед; углы y и z измеряются позади колена. Линия поведения представлена в табл. 4.

Читатель легко распознает эту хорошо известную двигательную активность.

ТАБЛИЦА 4

Переменная	Значения переменных по истечении различных промежутков времени (в секундах)								
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
w	45	10	—10	—20	—35	0	60	70	45
x	—35	0	60	70	45	10	—10	—20	—35
y	170	180	180	160	120	80	60	100	170
z	120	80	60	100	170	180	180	160	120

3.6. В любом физиологическом эксперименте нервную систему обычно рассматривают как систему, определяемую состоянием. Каждый физиолог, прежде чем начать исследование, исходит из того, что ее можно сделать такой, поскольку он принимает, что на нервную систему распространяется фундаментальное предположение (§ 2.15), состоящее в том, что если бы удалось детально определить все, касающееся нервной системы, в некоторый момент времени, то было бы определено и ее последующее поведение. Для того чтобы обеспечить надлежащую изоляцию системы — необходимое условие, без которого она не будет системой, определяемой состоянием (§ 2.15),— применяют ряд специальных методов, например наркоз, перерезку спинного мозга, перерезку корешков спинномозговых нервов и фиксацию тела и головы особыми зажимами. Таким образом, нервную систему в физиологическом эксперименте обычно можно (если нет особых доводов в пользу обратного) считать системой, определяемой состоянием.

3.7. Точно так же обычно принимают, что животное в экспериментах с условными рефлексами является такой физико-химической системой, поведение которой мы могли бы предсказать, если бы знали все ее детали.

Павлов настаивал на полной изоляции животного именно с целью обеспечить это положение. Таким образом, если нет особых доводов в пользу обратного, животное в опытах с условными рефлексами обычно можно считать системой, определяемой состоянием.

3.8. Эти два примера, однако, упомянуты лишь в качестве введения; нас в основном интересует природа живого организма, находящегося в естественной среде.

Если дан организм, то окружающую его среду мы определяем как *те переменные, которые влияют на организм, и те переменные, которые изменяются в результате поведения организма.* Среда определена, таким образом, в чисто функциональном, а не в материальном смысле. Мы будем трактовать ее так же, как все переменные: мы предполагаем, что ее можно представить показаниями на шкалах, что экспериментатор может исследовать ее путем первичных операций и что она сама по себе составляет систему, определяемую состоянием.

Организм и среда

3.9. Идею этого раздела можно сформулировать сразу же: свободноживущий организм с его средой могут быть достаточно точно представлены набором переменных, образующим систему, определяемую состоянием.

Представления, развитые в предыдущих параграфах, позволяют нам теперь исследовать организм и среду одними и теми же методами, так как относительно обоих приняты одинаковые исходные положения.

3.10. Как пример того, что организм и его среда образуют единую систему, определяемую состоянием, рассмотрим велосипед и велосипедиста (в отношении действий, направленных на сохранение равновесия).

Прежде всего движение вперед можно не учитывать, как не относящееся к делу, поскольку мы так же успешно могли бы изучать свойства этой динамической системы, если бы колеса находились на ленте, движущейся назад. Переменные можно установить, рассмот-

рев происходящий процесс. Предположим, что велосипедист потянет правую руку на себя; это изменит угловое положение переднего колеса (относительно рамы); в результате две точки соприкосновения колес с землей начнут смещаться вправо. (Физические причины этого смещения для нас безразличны: достаточно того, что существует определенная зависимость.) Поскольку центр тяжести велосипедиста вначале остается на месте, проекция его на поверхность земли будет все больше и больше отходить влево от линии, соединяющей точки опоры двух колес. В результате велосипедист начнет падать налево. Отклонение приведет к возбуждению нервных окончаний органов равновесия, импульсы будут поступать в нервную систему и, если это опытный велосипедист, будут переключаться в ней на такой путь, что они (или их последствия) приведут в действие мышцы, заставляющие *правую* руку перемещаться вперед.

Теперь мы можем установить, какие переменные должны составлять данную систему, чтобы она была системой, определяемой состоянием. Мы должны будем включить: угловое положение рукоятки руля, скорость бокового смещения двух точек соприкосновения между колесами и дорогой, боковое расстояние между линией, соединяющей эти точки, и проекцией центра тяжести велосипедиста и, наконец, угловое отклонение тела велосипедиста от вертикали. Эти четыре переменные, по определению, данному в § 3.8, составляют «среду» велосипедиста. [Отнесем ли мы эти четыре переменные к «велосипедисту» или к «среде», зависит от выбранной точки зрения (§ 3.12).] Для того чтобы получить систему, определяемую состоянием, можно добавить переменные нервной системы и работающих мышц и данные о положении костей и суставов.

В качестве второго примера возьмем бабочку и птицу в воздухе: птица охотится за бабочкой, а бабочка ускользает от нее. Опорой для обеих служит воздух. Каждое движение птицы возбуждает органы зрения бабочки, и возникающий стимул, действуя через нервную систему бабочки, вызывает изменения в движениях

ее крыльев. Эти движения воздействуют на окружающий воздух и вызывают изменения в положении бабочки. Изменение ее положения тотчас же изменяет процессы возбуждения в глазах птицы, а это через посредство нервной системы ведет к изменениям в движениях крыльев птицы. Их движения воздействуют на воздух и изменяют положение птицы. И так далее. Для птицы окружающей средой являются воздух и бабочка, а для бабочки — воздух и птица. Весь этот комплекс можно с полным основанием считать системой, определяемой состоянием.

3.11. Организм воздействует на среду, а среда воздействует на организм. О такой системе говорят, что она имеет «обратную связь» (§ 4.14). Иллюстрацией могут служить примеры из предыдущего параграфа. Мышцы руки велосипедиста поворачивают руль, вызывая изменения в среде, а изменения переменных среды через рецепторы велосипедиста вызывают изменения в его головном мозгу и мышцах. Когда птица и бабочка маневрируют в воздухе, каждый маневр одной из них вызывает ответные изменения в поведении другой.

Такая же особенность видна в типовой проблеме «котенок и огонь» (§ 1.17). Огонь как сложный раздражитель, действуя через нервную систему, вызывает ту или иную реакцию мышц котенка; в свою очередь движения котенка, изменяя положение его тела по отношению к огню, вызывают изменения в комплексе раздражителей, воздействующих на органы чувств котенка. Тогда рецепторы снова влияют на мышцы (через посредство нервной системы), а мышцы в свою очередь опять влияют на рецепторы (через посредство среды). Воздействия являются двусторонними, т. е. система обладает обратной связью. Это наблюдение не ново[1]:

> «В большинстве случаев изменение, вызывающее реакцию, бывает следствием движений самого

[1] Следует отметить, что представление о единстве организма и среды было подробно обосновано И. М. Сеченовым.—*Прим. ред.*

организма. Движения вызывают изменения в отношениях между организмом и средой; на эти-то изменения организм и реагирует. Все поведение свободно передвигающегося организма основано на том принципе, что сами движения организма приводят к новой стимуляции».

(Дженнингс)

«Когда хороший игрок участвует в быстрой игре с мячом, когда хирург производит операцию, когда врач принимает решения у постели больного — во всех этих случаях имеется как бы «поток» от воспринятых сигналов к выполняемому действию, опять к новым сигналам и к дальнейшему действию, вплоть до кульминационного пункта — достижения поставленной цели».

(Бартлет)

«Организм и среда образуют целое и их следует рассматривать как таковое».

(Старлинг)

На существование обратной связи в отношениях между свободноживущим организмом и окружающей средой необходимо указать потому, что большинство физиологических экспериментов намеренно ставится таким образом, чтобы избежать обратной связи. Скажем, в опыте со спинномозговыми рефлексами производят раздражение и регистрируют вызванное им движение; но движению не позволяют влиять на характер или на длительность раздражения. Таким образом, связь между стимулом и движением является односторонней. Подобное же отсутствие обратной связи обеспечивалось и в павловских опытах с условными рефлексами: раздражитель мог вызвать слюноотделение, но эта реакция не оказывала никакого влияния на характер или длительность действия раздражителя.

Это отсутствие обратной связи, конечно, полезно или даже необходимо при аналитическом изучении поведения какого-либо механизма — одушевленного или неодушевленного. Но полезность его в лаборатории не должна заслонять того факта, что в естественных условиях животное не подвергается таким ограничениям.

При тщательном изучении систем, действие которых кажется на первый взгляд односторонним, иногда обнаруживается, что они обладают обратной связью. Например, ходьба по ровному тротуару на первый взгляд так мало связана с какими-либо внешними предметами, что нервная система, казалось бы, действует без всякого учета их влияния. Но при спинной сухотке поступление сенсорных импульсов в головной мозг прекращается, тогда как выходящие из него двигательные импульсы проводятся нормально. Если бы ходьба зависела только от выходящих двигательных импульсов, болезнь не вызывала бы никакого нарушения этой функции. В действительности она сопровождается тяжелым расстройством ходьбы; это показывает, что приходящие сенсорные импульсы на самом деле играют важную, хотя и скрытую роль в нормальной функции.

Еще один пример, показывающий влияние обратной связи. Предположим, что нам нужно точно попасть в какую-либо точку (скажем, ввести проволоку в небольшое отверстие в доске), но мы не можем видеть, насколько мы отклоняемся от цели (например, если нужно ввести проволоку с другой стороны доски, по направлению к себе). Трудность этого обусловлена именно тем, что, хотя мы и можем влиять на положение проволоки, мы не получаем обратной информации о ее движениях и ее положении относительно отверстия.

Иногда наличие обратной связи выявляется лишь с трудом. Вот как описывает Ллойд Морган свои опыты с утятами, выращенными в инкубаторе:

> «Утята страшно любили купаться. Каждое утро в 9 часов в их загон ставили большой черный поднос, а на него — плоскую жестяную ванночку

с водой. Они стремительно бежали к ней, пили и купались в воде. На шестое утро поднос и ванночку принесли им, как обычно, но без воды. Они прибежали, собрались на дне ванночки и делали все движения клювом, как будто пили воду. Они припадали ко дну, опускали головы и помахивали хвостами, как это делали обычно. Минут десять они продолжали купаться в несуществующей воде...»

Поведение утят, по-видимому, указывало на то, что раздражители от подноса и ванночки неуклонно вызывали определенные действия и что результаты этих действий не оказывали никакого обратного влияния. Но дальнейший эксперимент показал, что известное влияние все-таки было:

«На следующий день опыт с сухой ванночкой был повторен. Утята опять прибежали, начали скрести по дну клювами и припадать ко дну. Но они вскоре перестали делать это. На третье утро они подошли вперевалку к пустой ванночке и удалились».

Поведение утят вначале говорило как будто об отсутствии обратной связи. Но на третий день изменение в поведении показало, что в действительности измененная обстановка «купания» произвела на них некоторое действие.

Значение обратной связи состоит в том, что обладающие ею системы обнаруживают известные свойства (§ 4.16), которых не может быть у систем, лишенных ее. *Системы с обратной связью нельзя анализировать так, как если бы это были системы одностороннего действия*, ибо обратная связь вносит свойства, которые можно объяснить только на основе особенностей данной обратной связи. (Напротив, систему с односторонним действием можно, не впадая в ошибку, рассматривать как систему, содержащую обратную связь: достаточно принять, что действие в одном из двух направлений осуществляется, но в нулевой степени (§ 2.3).Другими

словами, системы без обратной связи составляют подкласс класса систем с обратной связью.)

3.12. Поскольку организм и среду следует рассматривать как единую систему, линия раздела между «организмом» и «средой» становится отчасти условной и в меру ее условности произвольной. Конечно, с анатомической и физической точек зрения между двумя частями системы обычно существует вполне определенная и очевидная граница; но если мы рассматриваем систему с функциональной стороны, отбрасывая чисто анатомические факты как не относящиеся к делу, то разделение ее на «организм» и «среду» становится нечетким. Например, если механик с искусственной рукой пытается починить двигатель, то эту руку можно рассматривать либо как часть организма, который имеет дело с двигателем, либо как часть механического оборудования, с которым имеет дело человек.

Раз мы допустили эту условность разделения, для нее уже нельзя установить почти никаких границ. Резец в руке скульптора можно считать либо частью сложного биофизического механизма, придающего форму куску мрамора, либо частью материала, которым пытается управлять нервная система. Кости руки скульптора тоже можно рассматривать либо как часть организма, либо как часть «среды», окружающей нервную систему. Определенные переменные самого тела можно с полным правом рассматривать как «среду» для какой-то другой его части. Ребенку приходится учиться не только брать в руку кусок хлеба, но и жевать, не прикусывая своего собственного языка; функционально как хлеб, так и язык составляют часть «среды» для коры головного мозга. Но части среды, с которыми приходится иметь дело коре мозга, находятся иногда еще глубже внутри тела, чем язык; ребенок должен научиться играть, не изнуряя себя до предела, и говорить, вовремя переводя дыхание.

Эти замечания сделаны не с целью запутать читателя, а для того, чтобы показать, что последующие рассуждения (в гл. 15 и 16) не лишены оснований. Там мы

будем рассматривать одну группу нейронов в головном мозгу как «среду» для другой группы. Подобные разделения хотя и произвольны, но правомерны, так как мы всегда будем рассматривать систему как целое, разделяя ее на части этим необычным способом лишь для удобства словесного описания.

Следует заметить, что отныне слово «система» будет означать не нервную систему, а весь комплекс, состоящий из организма и среды. Например, если нужно будет показать, что «система» обладает некоторым свойством, читатель не должен думать, что это свойство приписывается нервной системе: оно принадлежит всему комплексу, и может потребоваться детальный анализ, чтобы выяснить, насколько оно зависит от отдельных частей.

3.13. В некоторых случаях динамическую природу взаимодействия организма со средой можно сделать более очевидной, пользуясь приемом, обычным в физике,— рассматривая животное как центр отсчета. В этом случае мы считали бы, что передвигающееся животное передвигает земной шар относительно самого себя. Если мы интересуемся только отношением между этими двумя объектами и не рассматриваем их отношений к какому-либо третьему, независимому телу, такой прием не поведет к ошибке. Он был использован в примере с велосипедом и велосипедистом.

Пользуясь координатами, фиксированными относительно животного, мы можем видеть, что животное обладает гораздо большим контролем над окружающей средой, чем могло бы показаться вначале. Например, лягушка не может превращать воздух в воду, но, находясь на берегу ручья, она может при помощи одного небольшого прыжка превратить свой мир из управляемого законами обычной механики в мир, управляемый законами гидродинамики.

Существенные переменные

3.14. Биолог должен рассматривать головной мозг не как субстрат «мысли» или нечто такое, что «мыслит», но как специализированное приспособление для выживания организма, подобное любому другому органу тела (§ 1.10). Нам придется неоднократно пользоваться понятием «выживание»; но прежде чем мы сможем его применять, мы должны, согласно § 2.10, преобразовать его в нашу стандартную форму и определить его значение на основе первичных операций.

Физико-химические системы могут претерпевать глубочайшие преобразования, не обнаруживая каких-либо изменений, явно аналогичных смерти, ибо материя и энергия неуничтожаемы. И все же различие между живой и мертвой лошадью достаточно очевидно. Кроме того, не может быть никаких сомнений в объективности различия, так как за эти две вещи платят совершенно разную цену на рынке. Это различие должно поддаваться объективному определению.

Мы полагаем, что определение можно получить следующим образом. Для того чтобы животное оставалось живым, известные переменные должны оставаться в известных физиологических пределах. Что это за переменные и каковы эти пределы, зависит от вида животного. На практике эксперименты проводят не на животных вообще, а на животных, принадлежащих к одному определенному виду. У каждого вида важность многочисленных физиологических переменных для выживания весьма различна. Например, если длина волос у человека изменится от 10 до 2 *см*, это будет сущий пустяк; если же его систолическое кровяное давление упадет со 120 до 30 *мм* рт. ст., это быстро приведет к смерти.

У каждого вида организмов есть ряд переменных, которые имеют близкое отношение к выживанию и находятся в тесной динамической связи между собой, так что значительные изменения одной из них ведут раньше или позже к значительному изменению осталь-

ных. Например, если мы найдем, что частота пульса у крысы упала до нуля, мы сможем предсказать, что и частота дыхания вскоре будет равна нулю, что температура тела скоро снизится до комнатной температуры и что число бактерий в тканях скоро возрастет от величины, близкой к нулю, до очень высокой. Эти важные и тесно связанные между собой переменные мы будем называть существенными переменными животного.

Спрашивается, как мы можем найти их, учитывая, что мы не должны пользоваться заимствованным знанием, а должны находить их с помощью методов, описанных в гл. 2? В этом нет никакой трудности. Мы просто наблюдаем, что́ происходит с представителями данного вида животных после самых разнообразных начальных состояний. Мы найдем, что вслед за большими начальными изменениями одних переменных в системе возникают лишь временные отклонения, тогда как вслед за большими начальными изменениями других возникают отклонения, которые все больше возрастают, пока «машина» не превратится в нечто весьма отличное от того, чем она была вначале. Таким образом, результаты этих первичных операций позволят совершенно объективно отличить существенные переменные от всех остальных.

3.15. Существенные переменные неодинаковы по степени опасности и быстроте летального действия их отклонений. Есть такие переменные — например, содержание кислорода в крови или структурная целостность продолговатого мозга,— выход которых за пределы нормы почти сразу приводит к смерти. Есть и такие — целость какой-нибудь кости ноги, количество микроорганизмов в полости брюшины и др.,— отклонение которых от нормы нужно считать серьезным, хотя и не обязательно смертельным изменением. Существуют, наконец, такие переменные, выход которых за пределы нормы — например, резкое повышение давления или температуры в каком либо участке кожи — не несет в себе непосредственной опасности,

но так часто бывает связан с приближением какой-нибудь *действительно* серьезной угрозы, что организм избегает подобных ситуаций (которые мы называем «болезненными»), как если бы они были потенциально смертельными. Все, что нам нужно,— это возможность расположить переменные организма приблизительно в порядке их важности. Точность этого порядка не столь существенна, так как мы нигде не будем использовать его как основу для определенных выводов.

Теперь мы можем определить «выживание» объективно, на основе концепции поля: оно имеет место тогда, когда линия поведения не выводит ни одну из существенных переменных за заданные пределы.

Глава 4

СТАБИЛЬНОСТЬ

4.1. Слова «стабильность» («устойчивость»), «установившийся режим» и «равновесие» разные авторы употребляют в различных значениях, хотя приблизительный смысл их всегда бывает одинаков. Поскольку стабильность и ее свойства будут для нас очень важны, нам необходимо дать им точное определение.

Мы можем начать обсуждение этого вопроса с трех стандартных элементарных примеров. Куб, опирающийся одной гранью на горизонтальную плоскость, представляет типичный случай «устойчивого» (стабильного) равновесия; шар, лежащий на горизонтальной плоскости,— типичный случай «безразличного» равновесия, а конус, установленный на остром конце,— типичный случай «неустойчивого» (нестабильного) равновесия. Случаи безразличного и неустойчивого равновесия не представят для нас интереса, но понятием «устойчивого равновесия» мы будем пользоваться неоднократно.

Указанные три динамические системы ограничены в своем поведении тем, что каждая из них содержит определенное количество энергии, так что любое последующее движение должно согласоваться с этой постоянной величиной (инвариантой). Мы, однако, будем рассматривать системы, обладающие свободной энергией в избытке и поэтому не подверженные такому ограничению. Приведем два примера.

Первый из них — регулятор Уатта. Паровая машина вращает два груза, которые при более быстром вращении расходятся на большее расстояние под дейст-

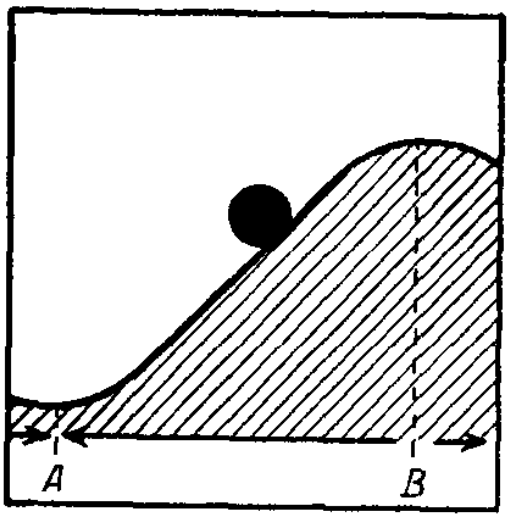
вием центробежной силы. Их расхождение механически регулирует положение дроссельного клапана, а положение дроссельного клапана регулирует поступление пара в машину. Связи организованы таким образом, что ускорение работы паровой машины ведет к уменьшению поступления пара. Поэтому, если какой-либо временно действующий фактор замедлит или ускорит работу машины, регулятор возвращает скорость к ее обычной величине. Этим возвращением система демонстрирует свою стабильность.

Второй пример — термостат. Есть много типов термостатов, но все они работают на одном и том же принципе: охлаждение основной камеры приводит к изменению, которое в свою очередь ведет к тому, что нагревание становится более сильным или более эффективным, и наоборот. Результат состоит в том, что если какой-либо временный фактор вызовет охлаждение или перегревание основной камеры, термостат возвращает ее температуру к обычному уровню. Этим возвращением система проявляет свою стабильность.

4.2. Важная особенность стабильности состоит в том, что это понятие относится не к материальному телу (или «машине»), а только к какому-то его свойству или аспекту. Это положение проще всего подтвердить примером, показывающим, что одно и то же материальное тело может находиться одновременно в двух равновесных состояниях. Представим себе квадратную карточку, установленную на ребро и находящуюся в равновесии; карточка неустойчива к смещениям, перпендикулярным этому ребру, но к смещениям, в точности параллельным ему, она, по крайней мере теоретически, устойчива.

Этот пример служит подкреплением того тезиса, что мы обычно изучаем не физические тела, а только тщательно абстрагированные от них сущности. Вопрос станет более ясным, когда мы в соответствии с требованиями § 2.10 определим стабильность на основе результатов первичных операций. Это можно сделать следующим образом.

4.3. Рассмотрим волнистую поверхность, лежащую горизонтально, и шарик, скатывающийся с гребня по направлению к ложбинке. Фотография, снятая в середине его пути, выглядела бы примерно так, как фиг. 8. Мы могли бы рассматривать состояние шарика как неустойчивое, так как он скатился с гребня, пока мы



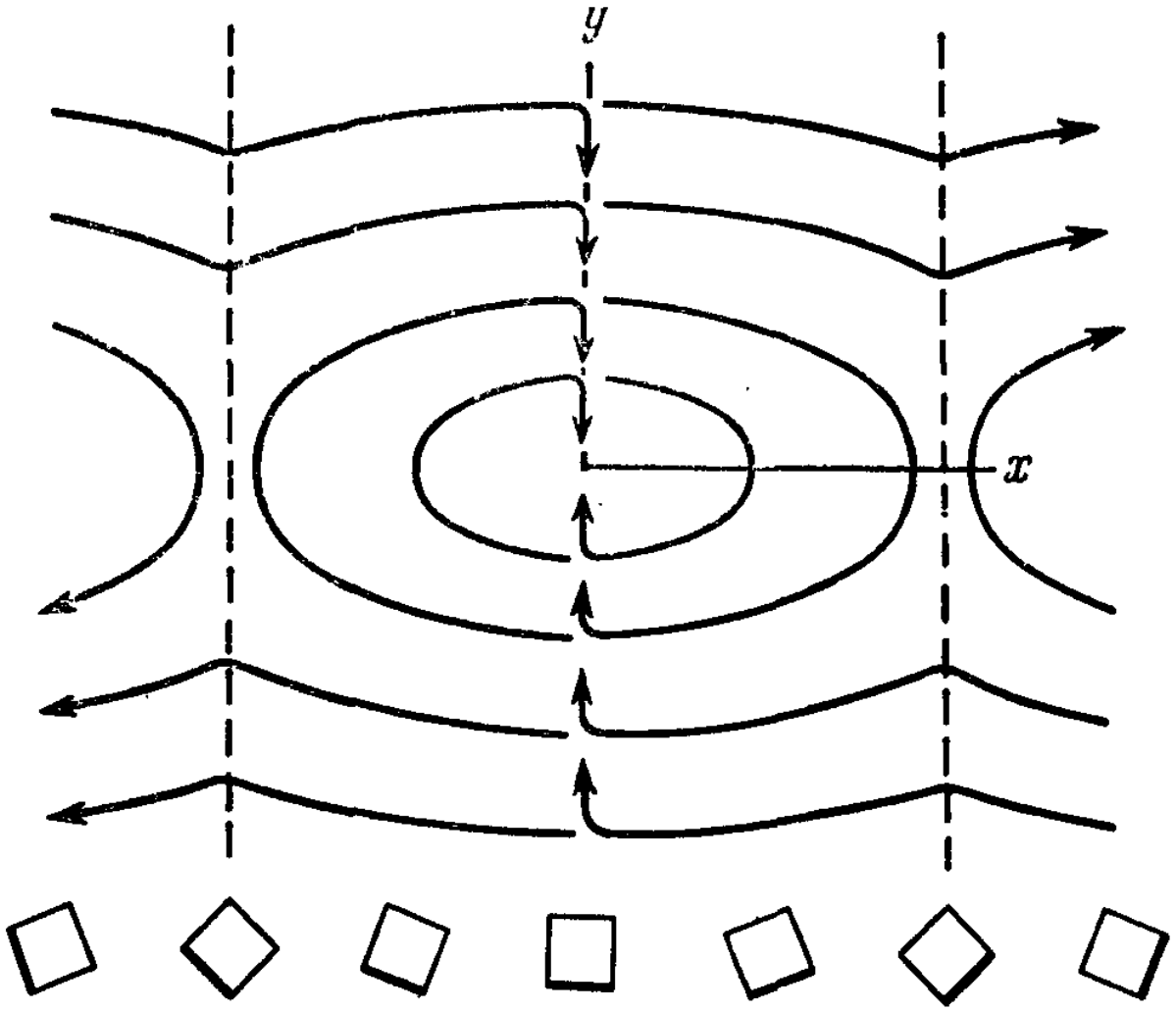
Фиг. 8.

не заметим, что его состояние можно считать в то же время устойчивым, так как он катится в сторону ложбинки. Эта двойственность показывает, что наш подход к понятию неверен. Ситуацию можно сделать более ясной, если удалить шарик и рассматривать только поверхность. Тогда видно, что вершину гребня, поскольку дело идет о ее влиянии на движение шарика, можно рассматривать как положение неустойчивого равновесия, а дно ложбинки — как положение устойчивости, или стабильности. Теперь нам ясно, что если трение достаточно велико, чтобы мы могли пренебречь количеством движения, то система, состоящая из одной переменной — «боковое расстояние шарика» (скажем, от оси гребня),— является системой, определяемой состоянием, и имеет определенное постоянное поле, схематически изображенное стрелками внизу на фиг. 8.

От точки B линии поведения расходятся, а к точке A — сходятся. Мы предположительно заключаем, что понятие «стабильности» относится не к материальному телу, а к полю. Полю свойственна стабильность, если

линии поведения сходятся. (Точное определение дано в § 4.8.)

4.4. Точки A и B таковы, что шарик математически правильной формы, будучи помещен в любую из них, останется на месте. Если дано поле, то **состоянием равновесия** будет пункт, из которого репрезентативная точка не перемещается. На основании первичной



Фиг. 9. Поле системы из двух переменных, описанной в тексте (стр. 83).

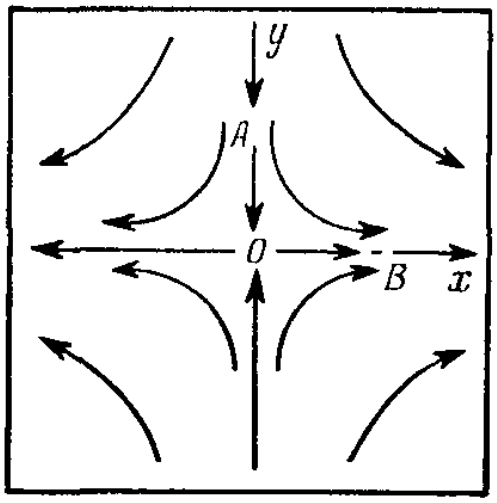
Внизу показано положение куба (вид сбоку) при различных углах наклона x его «главной» грани, выделенной жирной линией.

операции переход из этого состояния можно описать как переход «к тому же состоянию».

(Нужно отметить, что это определение говорит лишь о том, чтó происходит *в самой* точке равновесия, но не указывает, как должны проходить линии поведения вокруг этой точки. Они могут сходиться к ней, расходиться от нее или идти иными путями.)

Переменные не изменяют свою величину, когда система находится в состоянии равновесия, но эта инвариантность не означает, что «машина» бездействует. Например, неизменное состояние регулятора Уатта возможно и тогда, когда скорость работы двигателей не равна нулю. (Этот вопрос с большей полнотой рассмотрен во «Введении в кибернетику», § 11/15.)

4.5. Для иллюстрации того, что понятие стабильности принадлежит полю, рассмотрим поля, относящиеся к предыдущим примерам.

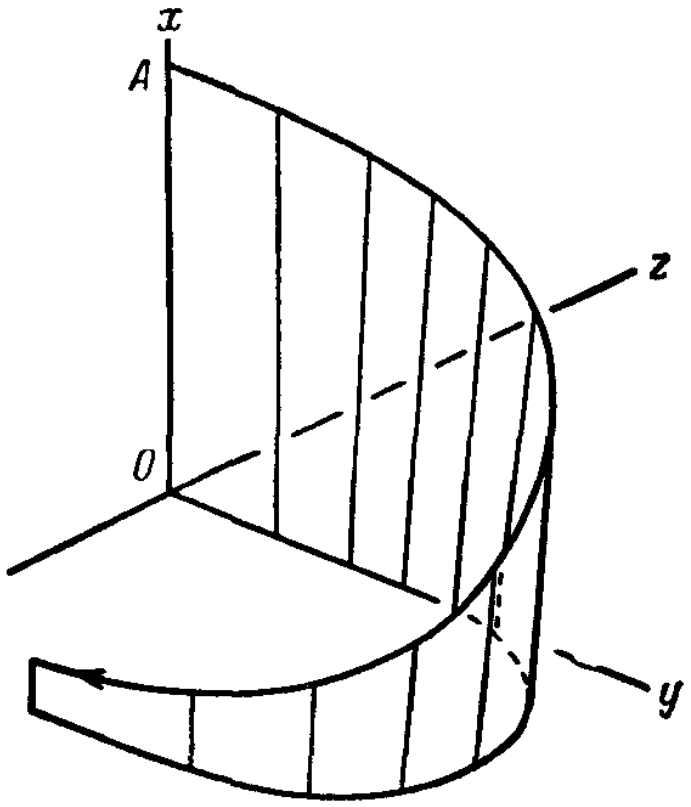


Фиг. 10.

Куб, лежащий на одной из граней, представляет определяемую состоянием систему из двух переменных: x — угол между плоскостью этой грани и горизонтальной плоскостью; y — скорость изменения этого угла. (Поведение этой системы зависит от количества движения куба.) Если куб не «отскакивает», когда его грань встречается с поверхностью стола, поле будет сходно с изображенным на фиг. 9. Стабильности куба, лежащего на грани, соответствует в этом поле схождение линий поведения к центру.

Квадратную карточку, стоящую в равновесии на ребре, можно приближенно представить двумя переменными, отражающими смещения, перпендикулярные нижнему краю (x) и параллельные ему (y). Поле будет сходно с изображенным на фиг. 10. За смещением репрезентативной точки из начала координат 0 в направлении

к A последует возвращение ее к 0, и это возвращение соответствует устойчивости (стабильности). За смещением из 0 в направлении к B последует удаление от данного участка поля, и это удаление соответствует неустойчивости. Неопределенность движений вблизи 0 соответствует неопределенности поведения карточки, установленной вертикально.



Фиг. 11. Одна из линий поведения в поле регулятора Уатта.

Для ясности за начало координат принято состояние покоя системы. Система была смещена в точку A, а затем предоставлена самой себе.

Регулятор Уатта имеет более сложное поле, но известное приближение можно найти без труда. С точностью, достаточной для наших целей, эту систему можно представить тремя переменными:

x — скорость работы двигателя и вращения регулятора (*об/мин*),

y — расстояние между грузами или положение дроссельного клапана,

z — скорость поступления пара.

(y представляет любую из двух указанных величин, так как между ними существует строгая зависимость.) Если что-либо внезапно вызывает ускорение работы

двигателя, увеличивая x, то это увеличение x приводит к увеличению y; за увеличением y следует уменьшение x. Поскольку эти изменения не скачкообразны, а непрерывны, линия поведения должна быть сходна с изображенной на фиг. 11. Другие линии поля можно было бы добавить, рассмотрев, что́ происходит после других отклонений (эти линии будут идти из точек, отличных от A). Несмотря на различие начальных состояний, все линии будут сходиться к точке 0.

4.6. В некоторых наших примерах (в примере с кубом и др.) линии поведения оканчиваются в точке, в которой прекращается всякое движение. В других примерах движение прекращается не полностью; во многих термостатах температура, приблизившись к точке равновесия, начинает совершать небольшие регулярные колебания. Нас редко будут интересовать детали того, что происходит в самом центре поля.

4.7. Более важен основной факт: во всех случаях стабильная система характеризуется тем, что после смещения мы можем установить некоторый *предел* для последующего движения репрезентативной точки, тогда как в нестабильной системе такое ограничение либо невозможно, либо зависит от обстоятельств, внешних по отношению к обсуждаемой проблеме. Например, если термостат установлен на 37° С и температура его смещена до 40°, то мы можем предсказать, что в будущем она не выйдет из определенных границ, которыми для данного аппарата могут быть, скажем, температуры 36 и 40°. Если же термостат был собран с ошибкой в каком-нибудь компоненте и стал поэтому нестабильным (§ 4.14) и если температура его смещена до 40°, то мы не можем указать никаких пределов для последующих температур, не вводя в рассмотрение таких новых факторов, как, скажем, точка плавления припоя.

4.8. Эти рассуждения подводят нас к следующим определениям. Если дано поле системы, определяемой состоянием, и дана некоторая область этого поля, то данная область **стабильна**, если линии поведения, идущие из всех ее точек, остаются внутри этой области.

Например, отметим на фиг. 8 с обеих сторон от точки A границы некоторой области. Все репрезентативные точки внутри нее будут двигаться к A и ни одна из них не может выйти из нее; следовательно, область стабильна. Около же точки B подобную область выделить нельзя (если только не ограничить ее самой точкой B).

Из этого определения ясно, что изменение поля или области может изменить результат опыта. Как правило, мы не можем сказать, что данная система безусловно стабильна (или нестабильна). Это видно на примере полей, изображенных на фиг. 9 и 10. (В последнем случае области, ограниченные какой-либо частью оси y, включая начало координат, стабильны; все остальные области нестабильны.)

Приведенные примеры были выбраны с целью основательной проверки определения. Часто поля бывают более простыми. В поле куба, например, можно провести множество границ овальной формы так, что заключенные в них области будут стабильными. К такому типу относится и поле регулятора Уатта.

Мы будем говорить, что *поле* стабильно, если стабильна вся занимаемая им область; тогда стабильной можно назвать и *систему*, которой принадлежит поле.

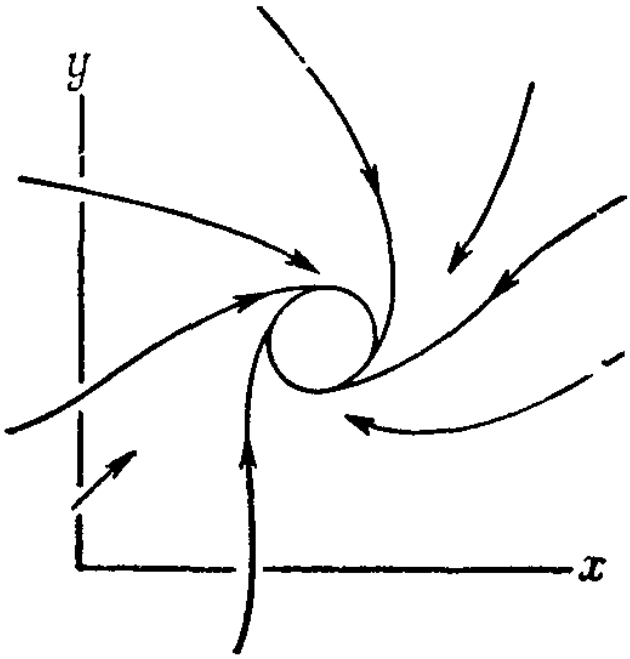
4.9. Иногда условия бывают еще проще. Система может иметь только одно состояние равновесия, и линии поведения могут либо все сходиться к нему, либо все расходиться от него. В таком случае для указания направления линий достаточно без всяких оговорок сказать, что «поле стабильно» (или нестабильно). Систему можно правильно описать с помощью такого простого утверждения (без указания области) только тогда, когда ее поле, т. е. ее поведение, достаточно просто.

4.10. Если линия поведения снова входит в самое себя, система проделывает повторяющийся цикл. Если цикл целиком помещается в данной области и линии поведения *входят* в него, то цикл стабилен.

Подобный цикл обычно свойствен термостатам, которые после ликвидации грубого отклонения переходят

к регулярным колебаниям малой амплитуды. В таком случае линии поведения будут сходиться не к точке, а к циклу, как в преувеличенном виде показано на фиг. 12.

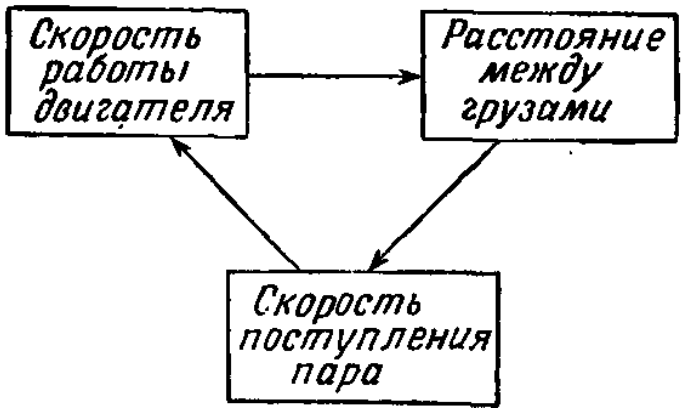
4.11. Это определение стабильности удовлетворяет требованию § 2.10, ибо наблюдаемое поведение системы определяет поле, а поле определяет стабильность.



Фиг. 12.

Схема непосредственных воздействий

4.12. Описание действия регулятора Уатта, сделанное в § 4.1, показало, что это действие образует функциональный цикл: цепь причин и следствий замкнута. Если мы представим непосредственное воздействие A на B символом $A \to B$, то устройство регулятора Уатта можно представить схемой:



(Число указанных здесь переменных является отчасти произвольным.)

Теперь я хочу ясно показать, что схемы этого типа, при наличии их точного определения, можно *полностью выводить из результатов первичных операций*. Для их построения нет необходимости ни в каком метафизическом или заимствованном знании. Чтобы показать, как это делают, рассмотрим пример с реальным регулятором Уатта.

Берут поочередно каждую пару переменных. Допустим, что сначала исследуют зависимость между «скоростью работы двигателя» и «расстоянием между грузами». Экспериментатор должен фиксировать на определенном уровне величину переменной «скорость поступления пара» и всех других «посторонних» переменных, изменения которых могли бы сделать неясной зависимость между скоростью работы двигателя и расстоянием между грузами. Затем он должен испытывать различные скорости работы двигателя и наблюдать, как это сказывается на поведении переменной «расстояние между грузами». Он найдет, что за изменениями скорости регулярно следуют изменения этого расстояния. Таким образом, на переход переменной «расстояние между грузами» от одной величины к другой *действительно* влияет величина скорости работы двигателя. Экспериментатору ничего не нужно знать о природе всех действующих физических связей— ему достаточно наблюдать факт. Затем, продолжая поддерживать «скорость поступления пара» на постоянном уровне, он должен испытывать различные расстояния между грузами и наблюдать действие таких изменений на скорость работы двигателя; он найдет, что никакого влияния они не оказывают. Таким образом он установит, что между этими переменными нужно поставить стрелку слева направо, но не справа налево:

Затем эту процедуру можно будет повторить с двумя переменными «расстояние между грузами» и «скорость поступления пара», поддерживая третью переменную— «скорость работы двигателя» —на постоянном уровне. И, наконец, можно будет установить зависимость между членами третьей пары.

Очевидно, что это всеобщий метод. Для того чтобы найти непосредственные воздействия в системе с переменными A, B, C, D..., нужно взять одну пару, скажем A и B; поддерживать все остальные переменные C, D... на постоянном уровне; отметить поведение B, когда A имеет начальную величину A_1, а также тогда, когда эта величина равна A_2. Если поведение B в обоих случаях одинаково, то A не оказывает на B никакого непосредственного воздействия. Но если поведение B различно и закономерно меняется в зависимости от начальной величины A, то непосредственное воздействие *существует*, что можно обозначить $A \rightarrow B$.

Меняя местами A и B в этой процедуре, мы можем затем проверить наличие связи $B \rightarrow A$. Испытывая поочередно другие пары, можно установить все непосредственные воздействия. Этот процесс состоит только из первичных операций, и, следовательно, здесь не используется никакое заимствованное знание (дальнейшее рассмотрение этого процесса см. в § 12.3.). Мы будем часто пользоваться такого рода **схемой непосредственных воздействий.**

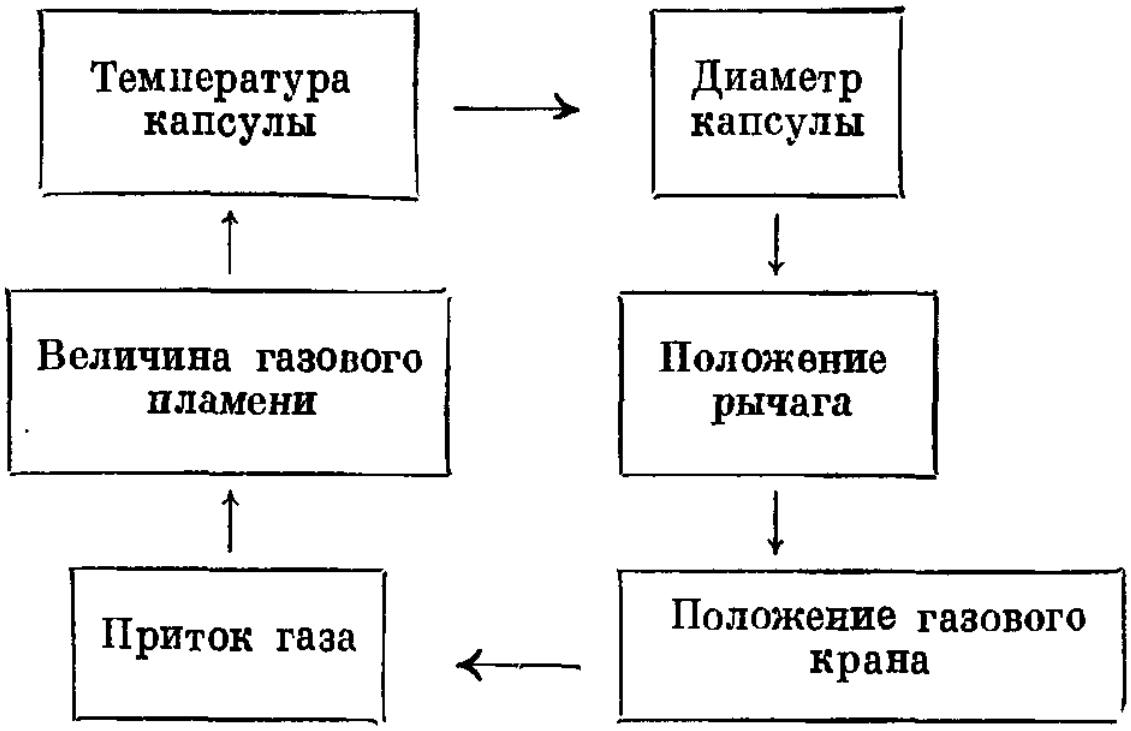
4.13. Следует заметить, что стрелка в схеме, хотя она иногда и соответствует какому-то реальному материальному каналу (стержню, проводу, нервному волокну и т. п.), в основе своей не имеет отношения к материальным связям, а служит лишь *обозначением зависимости между поведением переменных* A и B. Строго говоря, она относится только к A и B и не касается никаких промежуточных звеньев.

Решающим фактором, на основании которого можно выдвинуть гипотезу о канале связи между A и B, является наличие функциональной (проявляемой в поведении) зависимости между ними; это было ясно показано

в 1888 г. в тот день, когда Генрих Герц произвел свой знаменитый опыт. Он имел два аппарата (скажем, *A* и *B*), между которыми не было никакой очевидной структурной связи; и тем не менее всякий раз, когда он в любой произвольно выбранный момент замыкал контакт в аппарате *A*, в аппарате *B* проскакивала искра, т. е. поведение *B* в любой момент зависело от положения выключателя в *A*. Здесь было прямое противоречие: материально (в структурном отношении) две системы *не были* связаны, однако функционально поведение одной *было* связано с поведением другой. Все ученые признали, что данные о *поведении* могут служить окончательным доводом, доказывающим наличие какой-то связи.

Обратная связь

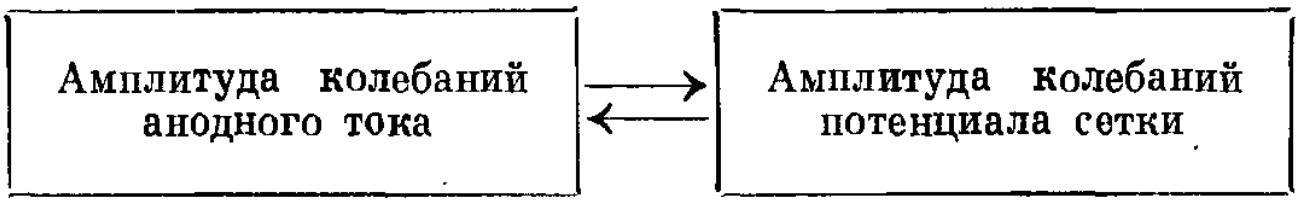
4.14. Газовый термостат тоже имеет замкнутую функциональную цепь (цикл), или обратную связь; он регулируется капсулой, которая при своем тепловом расширении передвигает рычаг, регулирующий приток газа к нагревающему пламени, так что схема непосредственных воздействий выглядит следующим образом:



Мы предлагаем читателю самому убедиться в том, что каждая стрелка представляет физическое действие,

которое можно продемонстрировать, если все переменные, кроме одной пары, поддерживать на постоянном уровне.

Другим примером служит «реакция», происходящая в радиоприемнике. Мы можем представить его действие двумя переменными, связанными в двух направлениях:



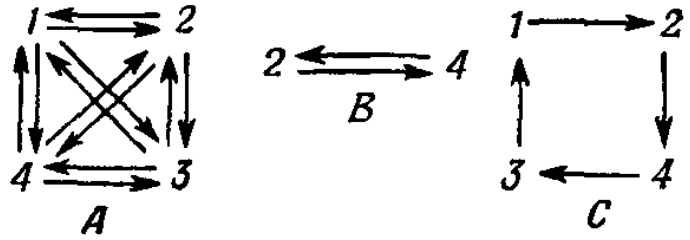
Нижней стрелкой представлено действие потенциала сетки электронной лампы на анодный ток, а верхней стрелкой — та особенность схемы, благодаря которой колебания анодного тока влияют на потенциал сетки. Эффект, представленный нижней стрелкой, определяется конструкцией лампы, а «верхний» эффект — устройством схемы.

Системы, переменные которых влияют друг на друга через посредство одной или нескольких замкнутых цепей, обладают, как говорят в радиотехнике, «обратной связью»; такие системы иногда называют также «сервомеханизмами». Они по меньшей мере так же стары, как регулятор Уатта, а может быть, и еще древнее. Но только в последнее десятилетие было осознано, что наличие обратной связи дает машине потенциальные возможности, которых нет у машины, лишенной такой связи. Этот прогресс совершился в основном в период последней войны под влиянием потребности в автоматических методах управления прожекторами, зенитными орудиями, ракетами и торпедами; его облегчали огромные успехи в области электроники. В результате появилось множество новых машин, способных к саморегулированию и самокорректированию, что было достигнуто впервые. Некоторые из их главных свойств будут описаны в § 4.16.

Природа, величина и направление обратной связи обычно оказывают решающее влияние на стабильность или нестабильность системы. Например, в регуляторе

Уатта или в термостате изменение полярности включения какой-либо части, инверсируя действие одного из звеньев на последующее звено, может превратить систему из стабильной в нестабильную (что, вероятно, и произойдет). В рабочей цепи радиоприемника стабильность или нестабильность определяется количественным соотношением между эффектами разной полярности.

Нестабильность в таких системах проявляется в «выбросах». Малейшее возмущение усиливается в результате его круговой передачи по замкнутой цепи, так



Фиг. 13.

что оно непрерывно растет, превращаясь во все большее отклонение от среднего состояния. Это явление тождественно тому, что называют «порочным кругом».

4.15. Выше были рассмотрены примеры систем с простой замкнутой цепью. Но более сложные системы могут иметь много переплетающихся замкнутых цепей. Если, например (как будет описано в § 8.2), существуют четыре переменные и все они действуют друг на друга, то схема непосредственных воздействий будет такой, как показано на фиг. 13, *A*. Легко убедиться, что такая система содержит 20 переплетенных замкнутых цепей, две из которых представлены схемами *B* и *C*.

Дальнейшая разработка теории систем с обратными связями невозможна без применения математики. Но здесь достаточно отметить два факта: 1) система, обладающая обратной связью, обычно бывает активно стабильной или активно нестабильной; 2) будет ли она стабильна или нестабильна, зависит от количественных деталей организации данной системы.

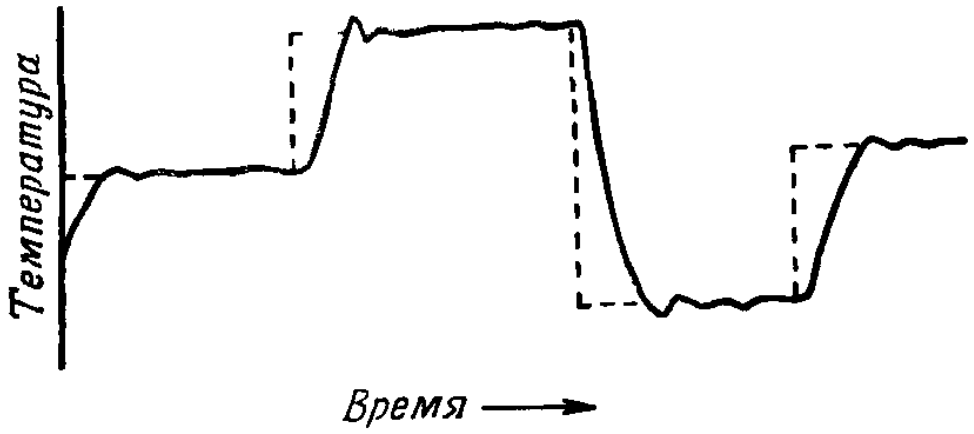
Поиск цели

4.16. Каждая стабильная система обладает тем свойством, что если ее вывести из состояния равновесия и предоставить самой себе, то ее последующее изменение окажется в таком соответствии с исходным отклонением, что система вернется к состоянию равновесия. *Таким образом, множество различных отклонений будет вызывать множество соответственных реакций.* Это можно подтвердить на примере простого поля, изображенного на фиг. 9.

Такую согласованность линии возвращения с исходным отклонением иногда рассматривали как «разумное» и свойственное только живым существам. Но простым опровержением служит обычный маятник: если мы отклоним его вправо, он развивает силу, стремящуюся сдвинуть его влево, а если мы отклоним его влево, он развивает силу, стремящуюся сдвинуть его вправо. Средневековый ученый, заметив, что маятник реагирует на различные отклонения возникновением сил, различных по направлению, но всегда толкающих его к среднему положению, сказал бы, что «маятник ищет середину». Этой фразой он признал бы, что поведение стабильной системы можно описать как «поиск цели». Мы можем, не внося никакого метафизического смысла, признать, что такой тип поведения действительно свойствен стабильным динамическим системам. Например, фиг. 14 показывает, как при изменениях установки термостата температура прибора все время следует за нею, приближаясь к заданной температуре так, как если бы это была ее цель.

Такое движение происходит здесь только в одном измерении (температура), но в других «ищущих цель» устройствах измерений может быть больше. Например, прожектор, управляемый радиолокатором, использует отраженные импульсы для такого изменения направления луча, которое сводит к минимуму угол между этим направлением и угловыми координатами источника отраженных импульсов. Если самолет меняет курс,

прожектор активно преследует его точно так же, как температура следовала за изменениями установки термостата. Такая система «ищет цель» в двух измерениях.



Фиг. 14. Кривая температуры термостата (сплошная линия) при изменениях установки регулятора (пунктирная линия).

Общее в этих примерах то, что оба устройства «управляются своей ошибкой»: каждое из них частично управляется отклонением состояния системы от равновесного состояния (которое в этих примерах может быть изменено внешним воздействием). На термостат влияет разность между действительной и заданной температурами. На прожектор влияет различие между двумя направлениями. Таким образом, *к машинам с обратной связью не относится часто повторяемое утверждение, что машины действуют вслепую и не могут исправлять своих ошибок.* Такое утверждение верно в отношении машин, не имеющих обратной связи, но не в отношении машин вообще (§ 3.11).

Теперь, когда мы установили, что обратную связь можно использовать для коррекции любого отклонения, нам легко понять, что нет предела сложности «целенаправленного» поведения, к которому могут быть способны машины, совершенно лишенные какого бы то ни было «жизненного» фактора. Например, автоматическое зенитное орудие может управляться импульсами от радиолокатора, отраженными как от преследуемого самолета, так и от собственных разрывающихся снаря-

дов, таким образом, что оно стремится свести к минимуму расстояние между местами их разрывов и самолетом. Такую систему, полностью автоматизированную, нельзя отличить по поведению от орудия, управляемого человеком: обе системы будут вести огонь по цели, учитывая все ее маневры и непрерывно используя свои ошибки для того, чтобы улучшить очередной выстрел. Это показывает, что система с обратной связью может быть полностью автоматической и тем не менее способной к активным и сложным поискам цели. То и другое вполне совместимо.

4.17. Можно заметить, что стабильность, как мы ее определили, отнюдь не предполагает неподвижности или негибкости. Правда, стабильная система обычно имеет состояние равновесия, в котором она не обнаруживает никаких изменений; но это отсутствие изменений нельзя принимать за неподвижность: будучи выведена из состояния равновесия, система перейдет к активным, иногда обширным и сложным, движениям. Стабильная система ограничена в своих изменениях лишь в том смысле, что ей несвойственны всевозможные беспредельные отклонения.

Стабильность и целое

4.18. Важная особенность стабильности (или нестабильности) системы состоит в том, что *это свойство принадлежит всей системе и не может быть приписано какой-либо ее части*. Это положение можно проиллюстрировать, рассмотрев первую схему § 4.14 с точки зрения практического конструирования термостата. Для того чтобы обеспечить стабильность всей системы, конструктор должен учесть следующее:

1) каково влияние температуры на диаметр капсулы, т. е. ведет ли повышение температуры к расширению или к сжатию капсулы;

2) в какую сторону будет двигаться рычаг при расширении капсулы;

3) в каком направлении будет поворачиваться газовый кран при движении рычага;

4) приведет ли данный поворот газового крана к уменьшению или к увеличению притока газа;

5) уменьшится или увеличится газовое пламя при увеличении притока газа;

6) как повлияет увеличение газового пламени на температуру капсулы.

Некоторые из ответов очевидны, но тем не менее необходимы. Когда известны все шесть ответов, конструктор может обеспечить стабильность только таким соединением составных частей (главным образом путем конструктивного оформления связей 2, 3 и 5), при котором они в целом образуют надлежащую систему. Пять из шести эффектов могут быть определены, но стабильность все еще будет зависеть от того, в каком отношении к ним находится шестой эффект. *Стабильность принадлежит только их сочетанию; ее нельзя отнести к частям, рассматриваемым в отдельности.*

Для того, чтобы подчеркнуть независимость стабильности системы от условий, касающихся частей, составляющих целое, мы приведем еще несколько примеров. (Доказательства наших положений даны в §§ 20.9 и 21.12).

а) Две системы можно соединить так, что они будут взаимодействовать между собой, образуя единую систему; то, что каждая из них в отдельности была стабильной, не позволяет ничего сказать о стабильности системы, образованной их соединением: она может быть либо стабильной, либо нестабильной.

б) Две нестабильные системы при их соединении могут образовать целое, которое будет стабильным.

в) Две системы могут образовать стабильное целое при одном способе соединения и нестабильное —при другом.

г) В стабильной системе фиксация одной из переменных может сделать систему из остальных переменных нестабильной.

Такие примеры можно умножать почти до бесконечности. Они иллюстрируют правило, согласно которому стабильность (или нестабильность) динамической системы зависит от частей и их взаимоотношений, взятых в целом.

4.19. То, что стабильность системы есть свойство системы как целого, связано с тем обстоятельством, что *наличие стабильности всегда предполагает известную координацию в действии частей друг на друга.* В термостате необходимость координации очевидна, так как если бы его части были соединены случайным образом, мы имели бы лишь один шанс из двух получить стабильную систему. Но по мере усложнения системы и ее обратных связей достижение стабильности становится еще более трудным и вероятность нестабильности возрастает. Радиотехники слишком хорошо знают, как легко сложная система с обратной связью теряет стабильность и как трудно найти именно ту комбинацию частей и связей, которая делает систему стабильной.

Этот вопрос подробнее рассмотрен в § 20.10; здесь же достаточно отметить то, что по мере увеличения числа переменных для достижения стабильности требуется все более и более тщательная координация действия одних переменных на другие.

Глава 5

АДАПТАЦИЯ КАК СТАБИЛЬНОСТЬ

5.1. Понятие «адаптация» до сих пор применялось нами без определения; эта неясность должна быть устранена. Определение не только должно быть точным, но, согласно § 2.10, оно должно быть дано в понятиях, полностью сводимых к первичным операциям.

5.2. Определение, согласно которому поведение животного «адаптивно», если животное «правильно реагирует на раздражитель», можно отвергнуть сразу же. Во-первых, оно предполагает какое-то действие экспериментатора и поэтому неприменимо, когда свободноживущий организм и его среда взаимно воздействуют друг на друга. Во-вторых, это определение не указывает, что значит «правильно»,— разве только это значит «так, как следовало бы реагировать животному по мнению экспериментатора». Такое определение бесполезно.

Гомеостаз

5.3. Я предлагаю определение, согласно которому *форма поведения* **адаптивна**, *если она удерживает существенные переменные* (§ 3.14) *в физиологических пределах.* Для полного обоснования такого определения потребовалось бы сопоставить его со всеми известными фактами — задача, невыполнимая по своему объему. Тем не менее это определение служит основой для решения нашей проблемы, и я должен рассмотреть его достаточно подробно, чтобы показать, насколько оно обоснованно и насколько широка его применимость.

Прежде всего я опишу факты, лежащие в основе понятия «гомеостаз», введенного Кэнноном. Они не имеют прямого отношения к проблеме научения, так как речь идет о врожденных механизмах; но эти механизмы настолько ясны и хорошо известны, что они могут служить идеальным основным примером. Они показывают, что:

1) каждый механизм «адаптирован» для достижения своей цели;

2) его цель состоит в удержании величин тех или иных существенных переменных в физиологических пределах;

3) почти все функционирование вегетативной нервной системы животного обусловлено такими механизмами.

5.4. В качестве первого примера можно взять механизмы, которые удерживают в известных пределах концентрацию глюкозы в крови. Эта концентрация не должна падать ниже $\sim$ 0,06%, иначе ткани будут испытывать недостаток в основном источнике энергии; она не должна также подниматься выше $\sim$ 0,18%, иначе наступят другие нежелательные последствия. Если уровень глюкозы в крови падает ниже $\sim$0,07%, то надпочечники начинают выделять адреналин, что заставляет печень превращать свои запасы гликогена в глюкозу; последняя поступает в кровь и противодействует падению ее концентрации. Кроме того, снижение уровня глюкозы в крови возбуждает аппетит, и животное (или человек) принимает пищу, которая, будучи переварена, доставляет организму глюкозу. С другой стороны, при избытке глюкозы в крови повышается секреция инсулина поджелудочной железой, что заставляет печень удалять глюкозу из крови. Ее удаляют также мышцы и кожа; почки помогают удалению глюкозы, выделяя ее с мочой, если концентрация ее в крови превышает 0,18%. Итак, мы имеем пять функций, которые производят один и тот же конечный эффект. Каждая из них действует таким образом, чтобы *ограничивать* колебания концентрации глюкозы, которые

могли бы иметь место в организме. Каждую из них можно по праву назвать «адаптивной», так как она способствует сохранению жизни животного.

Внутренняя температура тела теплокровного животного может отклониться от нормы в результате мышечной работы, болезни или воздействий погоды. Если температура повышается, то кожа краснеет и тело отдает больше тепла окружающему воздуху; начинает выделяться пот, и испарение воды отнимает у тела тепло; обмен веществ в организме замедляется, так что в нем образуется меньше тепла. Если тело охлаждается, происходят обратные изменения. Может начаться дрожь, и дополнительная деятельность мышц дает тепло, согревающее организм. Выделяется адреналин, вызывающий повышение тонуса мышц и интенсивности обмена веществ, что опять-таки увеличивает выделение тепла. Волосы или перья под действием находящихся в коже мельчайших мышц приподнимаются, и в промежутки между ними попадает больше воздуха, что сохраняет теплоту тела. В условиях крайнего холода человек, находясь в почти бессознательном состоянии, рефлекторно сгибает до предела все части своего тела, плотно прижимая руки к груди, а ноги — к животу. Очевидно, что такая поза сводит к минимуму открытую поверхность тела. Всеми этими способами организм стремится удержать температуру тела в пределах нормы.

Количество углекислоты в крови имеет большое значение в связи с влиянием CO_2 на щелочность крови. Если оно повышается, частота и глубина дыхания возрастают и углекислота быстрее выводится с выдыхаемым воздухом. Если оно падает, наступает обратная реакция. Таким способом щелочность крови удерживается в определенных пределах.

Сетчатка лучше всего функционирует при определенной интенсивности освещения. При ярком свете нервная система суживает зрачок, при слабом — расширяет его. Таким образом количество света, проникающее в глаз, также удерживается в определенных пределах.

Если на глаза постоянно воздействует яркий свет,— например, когда человек переселяется в тропики,— пигментные клетки сетчатки день ото дня растут в фронтальном направлении, пока они не начнут поглощать значительную часть падающего света, прежде чем он достигнет чувствительных клеток. Таким способом освещенность чувствительных клеток удерживается в известных пределах.

Под влиянием прямого солнечного света пигментные клетки кожи увеличиваются в числе и размерах, содержание пигмента в них возрастает. Благодаря этому изменению воздействие света на более глубокие слои кожи не превышает определенных пределов.

При пережевывании сухой пищи в ротовую полость обильно выделяется слюна. Она смачивает пищу и делает ее поверхность такой, что она уже не повреждает слизистую рта при жевании. Таким образом, благодаря секреции слюны трение при приеме пищи не ведет к разрушению тканей.

Объем циркулирующей крови может быть выведен из пределов нормы в результате кровотечения. После тяжелого кровотечения сразу же наступает ряд изменений: капилляры конечностей и мышц сжимаются, и кровь из них переходит в сосуды более важных внутренних органов; возникает сильнейшая жажда, заставляющая человека пополнять количество жидкости в организме из внешних источников; жидкость из тканей переходит в кровяное русло и увеличивает объем крови; свертывание крови в области раны способствует остановке кровотечения. Кровотечение имеет еще одно следствие: уменьшение числа эритроцитов снижает количество кислорода, доставляемого тканям; однако само это снижение доставки кислорода побуждает костный мозг к повышенной выработке эритроцитов. Все эти изменения способствуют удержанию величины переменных «объем циркулирующей крови» и «снабжение тканей кислородом» в нормальных пределах.

Каждое быстро передвигающееся животное подвержено повреждениям при столкновении с твердыми

предметами. Однако животные обладают рефлексами, сводящими к минимуму вероятность столкновения и механического повреждения тканей. Высокая механическая нагрузка вызывает повреждение — разрыв, смещение или перелом — только тогда, когда она превышает определенную величину, зависящую от того, на какую ткань она воздействует — на кожу, связку или кость. Таким образом, упомянутые рефлексы способствуют тому, чтобы механические нагрузки не превышали допустимых пределов.

Можно было бы привести много других примеров, но все они укладываются в одну схему. Какое-либо внешнее воздействие стремится вывести существенную переменную из ее нормальных границ; но само начинающееся изменение активирует механизм, *противодействующий* нарушению, вызванному внешним фактором. При помощи этого механизма изменения существенной переменной удерживаются в гораздо более узких пределах, чем в том случае, если бы влиянию внешнего фактора ничто не противодействовало. Это сужение пределов и есть объективное проявление адаптивности механизма.

5.5. Описанные в предыдущем параграфе механизмы действуют главным образом внутри тела, но следует отметить, что некоторые из них связаны и с внешней средой. Например, если температура тела повышена, нервная система уменьшает образование тепла в организме и температура тела снижается, но только потому, что тело непрерывно отдает тепло окружающей среде. Покраснение кожи ведет к охлаждению тела только в том случае, если окружающий воздух прохладен, а выделение пота — только тогда, когда воздух не насыщен водяными парами. Усиленное дыхание ведет к снижению содержания углекислоты в крови, но только тогда, когда атмосфера содержит ее меньше 5%. В каждом случае цепь причин и следствий частично проходит через окружающую среду. Таким образом, механизмы, действующие всецело внутри тела, и механизмы, широко использующие среду,— это лишь крайние ступени

непрерывного ряда. Например, при жажде животное ищет воду; если это рыба, ей остается только глотать, если же это антилопа в африканской степи, ей необходим сложный процесс поисков, передвижений и отыскания подходящего пути спуска к реке или пруду. Из этого видно, что механизмы гомеостаза весьма различны: они могут действовать всецело внутри самого животного и могут включать разнообразнейшую внешнюю активность; *принципы же везде одни и те же.*

Обобщенное понятие гомеостаза

5.6. Точно такой же критерий «адаптации» можно использовать для характеристики приобретенных форм поведения животного в природных условиях. Возьмем типовую проблему «котенок и огонь». Когда котенок впервые приближается к открытому огню, он может попытаться цапнуть его лапой, как если бы это была мышь, может прижаться к полу и начать подкрадываться к нему, может пытаться обнюхать его или будет продолжать приближаться к нему с полным безразличием. В результате любого из этих действий животное может обжечься. Точно так же, если в комнате холодно, котенок может сидеть вдали от огня и по-прежнему испытывать холод. Поведение котенка нельзя назвать адаптивным, так как температура его кожи не удерживается в нормальных пределах. Иными словами, животное не ведет себя гомеостатически в отношении температуры кожи. Сравните это поведение с поведением «опытной» кошки: в холодный день она приближается к огню на расстояние, выбранное так, что температура кожи будет и не слишком высокой и не слишком низкой. Если огонь разгорится сильнее, кошка будет отодвигаться от него, пока ее кожа вновь не будет обогреваться в умеренной степени. Если огонь будет затухать, кошка придвинется поближе. Если из очага выпадет раскаленный уголек, кошка предпримет такое действие, которое будет удерживать температуру кожи

в нормальных границах. Не интересуясь пока тем, что́ произошло в головном мозгу котенка, мы уже можем сказать, что если вначале поведение котенка не было гомеостатическим в отношении температуры кожи, то теперь оно стало таковым. Такое поведение «адаптивно»: оно охраняет жизнь животного, удерживая существенные переменные в определенных пределах.

Это положение применимо к очень многим, если не ко всем, формам поведения нормального взрослого человека. Для того чтобы продемонстрировать его широкую применимость и показать, что даже жизнь цивилизованного человека не составляет в этом смысле исключения, мы рассмотрим физическое и физиологическое действие некоторых условий окружающей среды, которые человек создал для себя сам. Мы покажем, что каждое из них действует таким образом, что суживает диапазон изменений существенных переменных человеческого организма.

Первое, что необходимо цивилизованному человеку,— это жилище; оно позволяет прежде всего поддерживать более равномерную температуру воздуха, в котором живет человек. Крыша поддерживает более постоянную сухость кожи. Окна, открытые летом и закрытые зимой, способствуют поддержанию равномерной температуры; этой же цели служат очаги и печи. Оконные стекла поддерживают освещенность комнат, близкую к оптимальной, что достигается также искусственным освещением. Дымовые трубы поддерживают количество дыма в комнатах на уровне, близком к оптимальному, т. е. к нулевому.

Можно без труда показать, что многие из других удобств цивилизации тоже ограничивают различные изменения существенных переменных человеческого организма. Рассмотрение всех случаев не имело бы конца. Но для того чтобы подкрепить наше утверждение, мы рассмотрим автомобиль, с целью показать его гомеостатическое значение для человека. Путешествие в автомобиле в отличие от путешествия пешком удерживает ряд существенных переменных в более узких

пределах. Утомление, вызываемое длительной ходьбой, указывает на то, что какие-то переменные, еще не вполне выясненные, выходят из границ, которых они не переходят, когда человек едет в машине. Запасы питательных веществ в организме меньше расходуются, кожа на подошвах ног меньше стирается, мышцы испытывают меньшую нагрузку, тело зимой меньше охлаждается, а летом меньше перегревается по сравнению с тем, что было бы, если бы человек передвигался пешком.

При более детальном исследовании обнаруживаются многие обстоятельства, благодаря которым автомобиль помогает нам удерживать наши существенные переменные в надлежащих границах. Крыша поддерживает постоянную сухость нашей кожи. Окна защищают нас от холодного ветра, а летом, будучи открыты, способствуют охлаждению нашего тела. Ковер на полу зимой действует подобным же образом, помогая избежать падения температуры ног ниже оптимальной величины. Дорожная тряска, создающая дополнительную нагрузку на кожу и на кости скелета, значительно смягчается благодаря рессорам. Сходным образом действуют амортизаторы и шины. Столкновение с каким-либо предметом привело бы к крайне резкому отрицательному ускорению, что создало бы очень высокую нагрузку на кожу и кости пассажиров. С помощью тормозов этих очень высоких нагрузок можно избежать, и таким образом тормоза удерживают переменные, относящиеся к нагрузке на кости, в более узких пределах. Хорошие фары удерживают освещенность дороги в более узких границах, чем это было бы без них.

Итак, мы видим, что тезис, согласно которому «адаптация» означает удерживание существенных переменных в физиологических пределах, верен не только в отношении простых функций «низших» животных, но и в отношении более сложных форм активности «высших» организмов.

5.7. Прежде чем идти дальше, нужно отметить, что термин «адаптация» обычно применяют в двух значениях, относящихся к различным процессам.

Это различие лучше всего показать на примере врожденных гомеостатических механизмов, какова, скажем, реакция «дрожи» при воздействии холода. Такой механизм может подвергаться «адаптации» двух типов. Адаптация первого типа произошла очень давно и состояла в изменении вида, слишком примитивного для проявления подобной реакции, в вид, у которого под действием естественного отбора эта реакция уже выработалась как характерная врожденная особенность. Адаптация второго типа происходит тогда, когда особь этого вида, обладающая врожденным механизмом, подвергается действию холода и изменяет свое состояние — отсутствие дрожи сменяется ее наличием. Первое изменение состоит в выработке самого механизма; второе заключается в том, что этот механизм под действием стимула проявляет свои свойства.

В процессе научения первый этап происходит тогда, когда животное «научается» — когда особь, не имеющая данного адаптивного механизма, превращается в особь, обладающую им. Второй этап совершается тогда, когда выработанный механизм переходит от бездействия к действию. В настоящей главе нас интересуют особенности уже выработанного механизма. Процесс, который привел к его выработке, будет рассмотрен в гл. 9.

5.8. Теперь мы можем сказать, что *«адаптивное» поведение эквивалентно поведению стабильной системы, область стабильности которой совпадает с той областью фазового пространства, в которой все существенные переменные не выходят из пределов нормы.*

Эта точка зрения не нова (хотя теперь ее можно сформулировать более точно):

> «Каждая фаза активности живого существа не только должна быть необходимым следствием какого-то предшествующего изменения в окружающей среде, но и должна быть так приспособлена к этому изменению, чтобы способствовать его нейтрализации и тем самым выживанию организма... Это должно быть применимо ко *всем*

реакциям живых существ. Следовательно, это должно быть ведущим принципом не только в физиологии... но и в других областях биологии, изучающих отношения между живым животным и его средой и факторы, определяющие его выживание в борьбе за существование».

(Старлинг)

«В открытой системе, подобной нашему телу, состоящей из нестойкого материала и все время находящейся в условиях, которые стремятся изменить ее, само постоянство свидетельствует о том, что в ней действуют или готовы действовать агенты, поддерживающие это постоянство».

(Кэннон)

«Каждая материальная система до тех пор может существовать как данная отдельность, пока ее внутренние силы притяжения, сцепления и т. д. уравновешиваются с внешними влияниями, среди которых она находится. Это относится ко всякому простому камню, как и к сложнейшему химическому веществу. Точно то же надо представлять себе и относительно организма. Как определенная замкнутая вещественная система он может существовать только до тех пор, пока он каждый момент уравновешивается с окружающими условиями. Как только это уравновешивание серьезно нарушается, он перестает существовать как данная система».

(Павлов)

Мак-Дауголл никогда не говорил прямо о «стабильности», но он описывал тип поведения, который он считал наиболее характерным для живого организма, следующими словами:

«Выньте из кармана бильярдный шар и положите его на стол. Он останется в покое, и мог бы оставаться в покое неограниченно долгое время, если бы на него не воздействовали никакие силы. Толкните его в любом направлении, и его движение в этом направлении будет продолжаться, пока не исчерпается его кинетическая энергия или пока он не натолкнется на борт и не пойдет по новому, математически определенному пути... Теперь сравните с этим какой-либо случай поведения организма. Извлеките боязливое животное, например морскую свинку, из норы или гнезда и посадите на открытую лужайку. Вместо того чтобы оставаться в покое, оно побежит обратно к норе; толкните его в любом другом направлении, и, как только вы уберете руку, оно повернет по направлению к норе; поместите на его пути любое препятствие, и животное будет пытаться обойти или преодолеть его; оно будет в беспокойстве продолжать свои попытки, пока не достигнет цели или не истощится его энергия».

Вряд ли Мак-Дауголл мог выбрать пример, яснее показывающий характерные проявления стабильности.

Выживание

5.9. Существуют ли аспекты «адаптации», не укладывающиеся в определение «стабильности»? Служит ли «выживание» единственным критерием адаптации? Можно ли утверждать, что римский солдат, убивший Архимеда в Сиракузах, обнаружил бо́льшую «адаптивность» поведения, чем Архимед?

На этот вопрос ответить нелегко. Он похож на поставленный в § 3.4 вопрос о том, все ли качества живого организма можно представить числами; сходным должен быть и ответ. Предполагается, что мы имеем дело главным образом не с более сложными, а с более

простыми существами, хотя примеры § 5.6 показали, что по крайней мере некоторые из форм активности человека можно верно оценить с помощью данного критерия.

Для того чтобы дать некоторое представление о типах поведения более примитивных животных, мы приводим (см. следующую страницу) классификацию Холмса, который ставил своей целью дать исчерпывающий список, но составлял его без каких-либо ссылок на понятие стабильности. Читатель может сам судить, насколько наша формулировка (§ 5.8) совместима со схемой Холмса.

Если исключить поведение, направленное на сохранение рода, то в отношении примитивных организмов, по-видимому, нет сомнения, что «адаптивность» поведения можно справедливо оценивать по тому, насколько она способствует выживанию организма.

5.10. Чрезвычайно характерной особенностью живых организмов является их «подвижность», их склонность к изменению. Мак-Дауголл хорошо представил эту особенность в отрывке, цитированном в § 5.8. Тем не менее наша формулировка концентрирует внимание на состоянии равновесия, на том факте, что существенные переменные приспособленного организма изменяются *меньше*, чем они изменялись бы при отсутствии адаптации. Что важнее: постоянство или изменение?

Эти два аспекта вполне совместимы, ибо *постоянство одних переменных может быть связано с высокой активностью других*. Хороший термостат быстро реагирует на небольшое изменение температуры, и именно энергичная реакция некоторых его переменных удерживает сдвиги других переменных в узких пределах. Наша точка зрения состоит в том, что постоянство существенных переменных имеет кардинальное значение, а активность других переменных важна лишь постольку, поскольку она способствует этой цели. (Более обстоятельно этот вопрос рассмотрен во «Введении в кибернетику», гл. 10.)

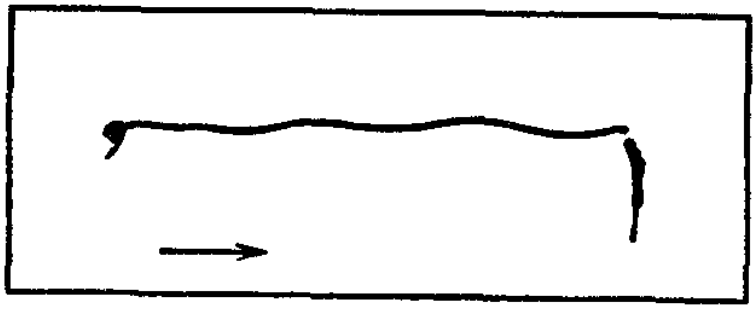
- Поведение
  - Неадаптивное
    - Бесполезные направленные реакции
    - Ошибочно направленный инстинкт
    - Аномальное половое поведение
    - Патологическое поведение
    - Бесполезная общественная активность
    - *Излишние случайные* движения
  - Адаптивное
    - Направленное на сохранение жизни особи
      - Питание
        - Ловля добычи, пожирание пищи
        - Подготовительная активность: устройство ловушек, подкарауливание добычи и др.
        - Собирание пищи, ее выкапывание
        - Миграции
        - Забота о добытой пище, ее хранение, закапывание, прятанье
        - Приготовление пищи
      - Защита
        - Защита от врагов (борьба, бегство)
        - Защита от сил, развиваемых неодушевленными объектами
        - Реакции на избыток тепла, силу тяготения, химические факторы
        - Защита от неодушевленных объектов
      - Улучшение состояния
        - Отдых, сон, игра, согревание
    - Направленное на сохранение вида
      - (Это поведение мы не рассматриваем — см. § 1.3)

Стабильность и координация

5.11. До сих пор мы исследовали отношение между понятиями «адаптация» и «стабильность». Теперь будет выдвинуто предположение, что «двигательная координация» тоже существенным образом связана со стабильностью.

«Двигательная координация» — понятие, хорошо известное в физиологии, где оно относится к способности организма так сочетать активность различных мышц, чтобы совершаемое движение точно следовало надлежащей траектории. Ему можно противопоставить представления о неуклюжести, треморе, атаксии, атетозе. Мы высказываем предположение, что о присутствии или отсутствии координации можно судить, согласно нашим методам, по тому, выходят ли отклонения данного движения за определенные пределы.

Такая формулировка, по-видимому, приемлема, если только мы измеряем отклонения движения конечности от некоторой линии, заданной произвольно; обычно ее задают, исходя из знания той линии, которой движение конечности следует в норме. Первым примером служит фиг. 15, где изображена линия, описываемая острием рапиры опытного фехтовальщика при нанесении удара. Нарушение координации проявилось бы в отклонении от предусмотренной линии движения.

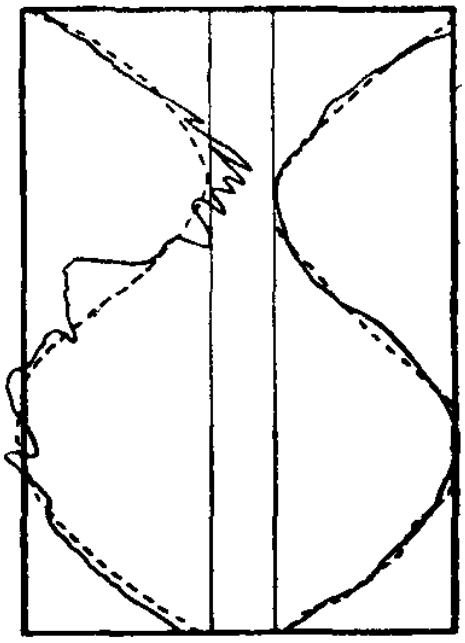


Фиг. 15.

Вторым примером служит запись движений, приведенная на фиг. 16. Испытуемого — больного с опухолью в левой половине мозжечка — попросили обвести пером пунктирные линии. Правая и левая кривые были

вычерчены соответственно правой и левой рукой. Запись ясно показывает худшую координацию движений левой руки. Какой критерий позволяет установить это? Существенное различие состоит в том, что отклонения линий от пунктира на левой стороне больше, чем на правой.

Таким образом, степень достигнутой координации можно измерять тем, насколько малы отклонения от



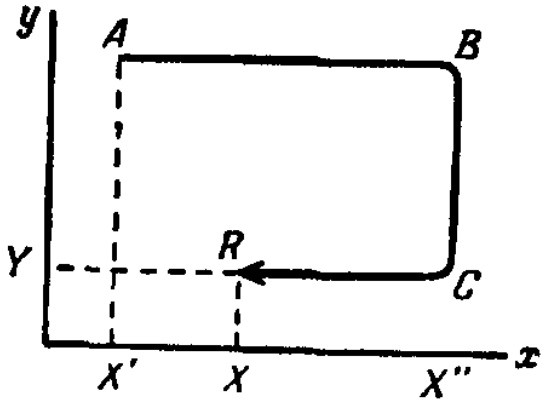
Фиг. 16. Запись попытки больного с опухолью мозжечка обвести пунктирные линии правой и левой рукой (по данным Гранта).

некоторой стандартной линии. Позже мы выскажем предположение, что существуют механизмы, действие которых удерживает перемененные в узких пределах. Если принять отождествление, предложенное в этом параграфе, то такие механизмы можно было бы считать пригодными для координации двигательной активности.

5.12. До сих пор мы отмечали у стабильных систем только их способность удерживать переменные в известных пределах. Но такие системы обладают и иными свойствами, из которых мы отметим два. Эти свойства проявляют и животные, и поэтому их иногда рассматривают как свидетельство того, что организм обладает

некоторой способностью к «разумному» поведению, отсутствующей у неживых систем. В отношении этих двух свойств такое предположение не является необходимым.

Первое свойство стабильная система обнаруживает тогда, когда линии поведения не возвращаются прямо, кратчайшим путем, к состоянию равновесия (как, например, на фиг. 11). В этом случае мы можем заметить, что переменные отклоняются от тех значений, которые



Фиг. 17.

они имеют в состоянии равновесия, и возвращаются к ним лишь впоследствии. Предположим, например, что поле (фиг. 17) стабильно и что в равновесном состоянии R переменные x и y имеют значения X и Y. Для ясности показана лишь одна линия поведения. Пусть система смещена в точку A и мы наблюдаем ее последующее поведение. Вначале, пока репрезентативная точка движется по направлению к B, переменная y почти не изменяется, но переменная x, имевшая вначале величину X', движется к величине X и проходит через нее к X''. Затем x сохраняет почти постоянную величину, а y изменяется, пока репрезентативная точка не достигнет C. Потом y перестает изменяться, а x изменяется по направлению к своей равновесной величине X и достигает ее. Теперь система пришла в состояние равновесия и никаких дальнейших изменений не происходит. Это только словесное описание того, что графически представлено полем.

Однако форма и другие особенности поля зависят в конечном счете от реального физического или химического устройства «машины», от которой абстрагиро-

ваны переменные. То, что линия поведения не идет прямо от A к R, должно быть обусловлено какой-то особенностью этого устройства, благодаря которой машина, чтобы перейти из состояния A в состояние R, по необходимости должна пройти через состояния B и C. Например, если бы машина содержала движущиеся части, их форма могла бы препятствовать прямому движению от A к R, или, в случае химической системы, препятствие могло бы быть термодинамическим. Но в том и другом случае наблюдатель, который следил бы за действием машины, считая ее живой, мог бы сказать: «Как умно! Деталь x не могла прямо перейти из A в R из-за этой преграды на ее пути; поэтому она направилась к B, что заставило деталь y перенести ее из B в C; а оказавшись в C, она могла уже прямым путем пойти обратно в R. Мне кажется, x обнаруживает предусмотрительность».

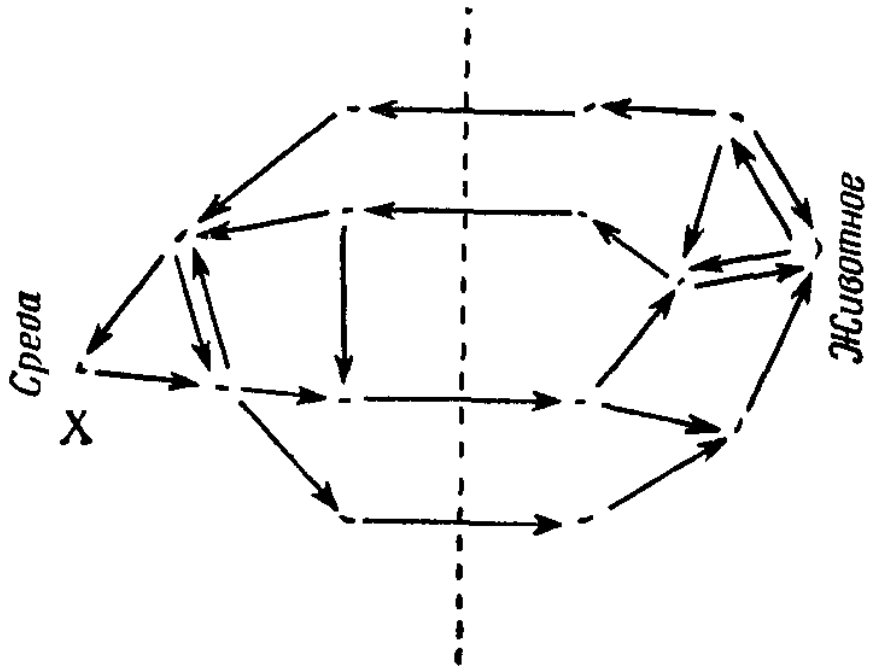
Обе точки зрения правомерны. Стабильную систему можно рассматривать как систему, слепо повинующуюся законам своей природы и в то же время обнаруживающую «умение» возвращаться в состояние равновесия, несмотря на препятствия[1].

5.13. Второе свойство проявляется тогда, когда организм реагирует на переменную, с которой он непосредственно не связан. Предположим, например, что схема непосредственных воздействий такова, как

---

[1] Я хотел бы особо отметить, что ко многому из того, о чем я пишу, независимо пришел Г. Зоммергоф. Я впервые увидел его «Аналитическую биологию» тогда, когда первое издание «Конструкции мозга» уже находилось в корректуре и я имел возможность только добавить название его книги к списку литературы. После этого стало очевидным, что мы шли параллельными путями, так как обнаружилось глубокое сходство общего подхода и метода в обеих книгах. Поверхностный читатель мог заметить некоторые различия и подумать, что наши взгляды расходятся, но я уверен, что эти различия касаются лишь второстепенных моментов, связанных с определениями или с подчеркиванием тех или иных сторон вопроса. Читателю, желающему глубже исследовать эту проблему, следует обратиться к книге Зоммергофа как к независимому ценному источнику.

на фиг. 18; переменные разделены пунктирной линией на «животное» (справа) и «среду» (слева), и животное не связано непосредственно с переменной X. Предполагается, что система стабильна, т. е. достигла «адаптированного» состояния (§ 5.7). При каком-либо внешнем воздействии она проявит координацию между частями (§ 5.12), и эта координация будет распространяться



Фиг. 18.

на всю систему (§ 4.18). Из этого следует, что поведение части, представленной «животным», будет координировано с поведением переменной X, хотя «животное» непосредственно с ней не связано. (Пример см. в § 8.7.)

У высших организмов, особенно у человека, способность правильно реагировать на что-либо такое, что нельзя непосредственно видеть или осязать, называли «воображением» или «абстрактным мышлением» или пользовались некоторыми другими терминами, точный смысл которых сейчас нет надобности обсуждать. Здесь мы должны лишь отметить, что координация поведения одной части с поведением другой части, не имеющей прямого контакта с первой,— это просто элементарное свойство стабильной системы.

5.14. Сформулируем теперь нашу проблему иначе, в новых понятиях. Опуская ради краткости второстепенные оговорки, мы можем подойти к ней следую-

щим образом. «Машина» с детерминированным поведением переходит из формы, способной лишь к хаотическому, неадаптивному поведению, в такую форму, в которой координация частей делает целое стабильным, способным удерживать свои существенные переменные в определенных границах,— спрашивается, как это может происходить? Например, какой должна быть конструкция термостата, чтобы он, будучи собран случайным образом, мог изменить соединение своих частей так, чтобы стать стабильным в отношении температуры?

Легко заметить, что эта новая формулировка вводит понятие о машине, изменяющей свою внутреннюю организацию. До сих пор об этом важном понятии ничего не говорилось, поэтому мы рассмотрим его в следующей главе.

Глава 6

ПАРАМЕТРЫ

6.1. До сих пор, рассматривая изменения переменных в системе, определяемой состоянием, мы игнорировали то, что все эти изменения происходят на фоне, состоящем из постоянных величин. Например, простой маятник имеет две переменные, которые, как известно (§ 2.15), таковы, что если нам дано определенное состояние системы, мы можем правильно предсказать ее дальнейшее поведение; но до сих пор мы только подразумевали то, что это верно лишь при постоянной длине маятника. Теперь нужно рассмотреть фон, состоящий из постоянных величин.

Всякая система абстрагируется путем выбора некоторых переменных из всего множества возможных переменных. «Определение системы» означает разделение всех переменных Вселенной на два класса: на переменные, входящие в систему, и переменные, не входящие в нее. Эти два типа переменных ничем не различаются по своей собственной физической природе, но находятся в весьма различном отношении к системе.

6.2. *Если дана система, то переменная, которая не включена в нее, является* **параметром.** В дальнейшем название «*переменная*» будет относиться только к величине, входящей в систему.

Если дана система, то параметры обычно имеют неодинаково близкое отношение к ней. Некоторые из них имеют к ней прямое отношение — изменение их величины существенно влияет на систему; таков параметр «длина маятника» по отношению к системе из двух переменных, упомянутой в предыдущем параграфе.

Другие параметры менее существенны для системы, так как их изменения влияют на нее лишь в незначительной степени; таков параметр «вязкость воздуха» по отношению к той же системе. И, наконец, для полноты можно упомянуть о бесконечном числе параметров, влияния которых на систему вообще нельзя обнаружить; таковы сила света, падающего на маятник, события в соседней комнате и изменения в отдаленных туманностях. Параметры, не оказывающие заметного влияния, можно игнорировать; но отношение эффективного параметра к системе должно быть понято достаточно ясно.

Если дана система, то эффективные параметры обычно неисчислимы, так что перечень их ограничен только пределами воображения автора. Например, на поведение той же системы из двух переменных могло бы влиять изменение следующих параметров: 1) длины маятника (которую мы до сих пор считали постоянной); 2) скорости движения воздуха в направлении качания маятника (которую мы до сих пор считали постоянной и равной нулю); 3) вязкости окружающей среды (которую мы до сих пор считали постоянной); 4) возможного движения точки подвеса; 5) силы тяжести; 6) магнитного поля; 7) модуля упругости нити маятника; 8) электростатического заряда маятника и зарядов на ближайших телах и т. д. Этот список можно продолжать до бесконечности.

Параметр и поле

6.3. Покажем теперь, как влияет изменение величины параметра на систему, определяемую состоянием. В табл. 5 сведены результаты 24 первичных операций, произведенных на упомянутой выше системе из двух переменных.

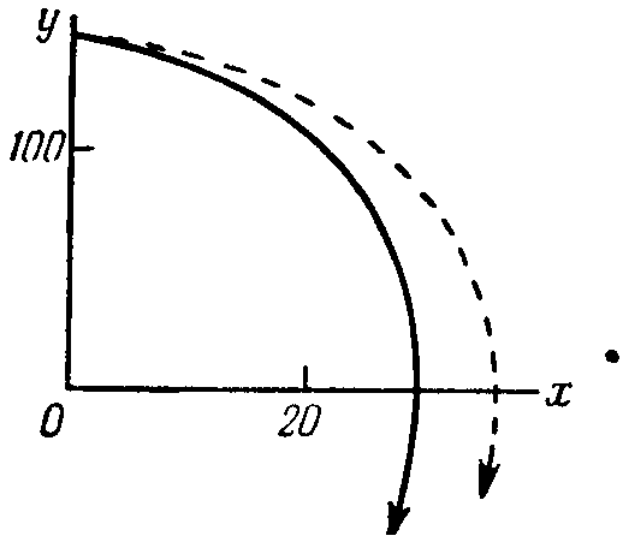
Первые четыре строки цифр показывают, что линии поведения после состояния $x=14$, $y=129$ одинаковы и, следовательно, система, в тех пределах, в которых она была испытана, определяется состоянием. Линия ее

ТАБЛИЦА 5

Длина, *см*	Линия поведения	Переменная	Значения переменных по истечении различных промежутков времени (в секундах)						
			0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
40	1	x	0	7	14	20	25	28	29
		y	147	142	129	108	80	48	12
	2	x	14	20	25	28	29	29	27
		y	129	108	80	48	12	—24	—58
60	3	x	0	7	14	21	26	31	34
		y	147	144	135	121	101	78	51
	4	x	21	26	31	34	36	36	35
		y	121	101	78	51	23	—6	—36

x — угловое отклонение от вертикали в градусах; y — угловая скорость в *град/сек*.

поведения показана сплошной линией на фиг. 19. В этих опытах длина маятника составляла 40 *см*.



Фиг. 19.

Затем этот параметр увеличили до 60 *см* и зарегистрировали еще две линии поведения. Оказалось, что линии

поведения после состояния $x=21$, $y=121$ одинаковы и, следовательно, система и здесь определяется состоянием. Линия ее поведения показана на фиг. 19 пунктиром. Но изменение величины параметра привело к тому, что линия поведения после $x=0$, $y=147$ изменилась.

Таким образом, две переменные находятся в следующей зависимости от данного параметра:

1) пока параметр не изменяется, система x, y является системой, определяемой состоянием, и имеет определенное поле;

2) после того как параметр изменяется от одной постоянной величины к другой, система x, y вновь становится системой, определяемой состоянием, и имеет определенное поле, но это поле не тождественно предыдущему.

Такая зависимость — общее правило. Изменение величины эффективного параметра изменяет линию поведения после каждого состояния. Из этого непосредственно следует, что *изменение величины эффективного параметра ведет к изменению поля.*

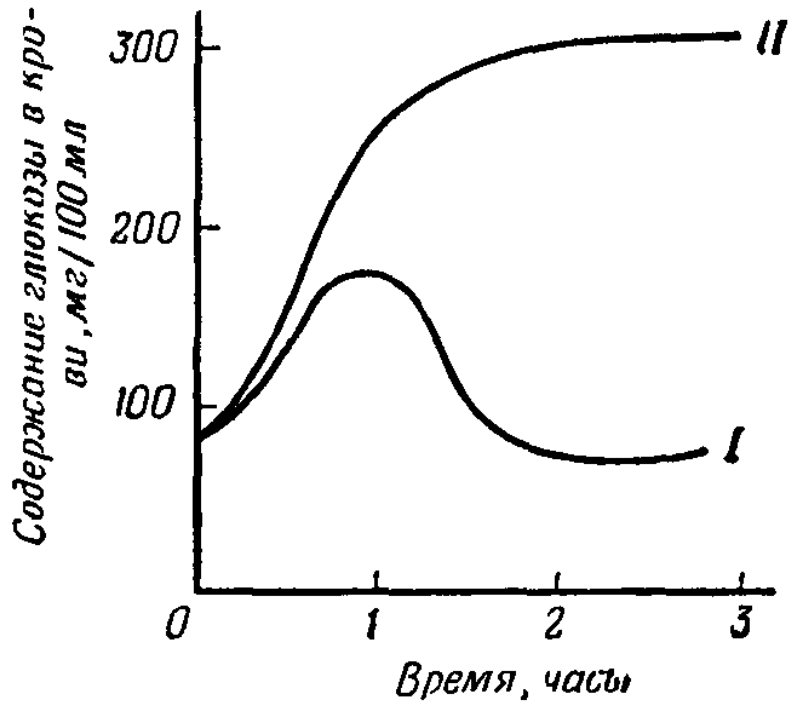
Отсюда выводится важная количественная зависимость: число полей системы в общем случае равно числу комбинаций, которые можно составить из различных значений ее параметров.

6.4. Значение различия между изменением переменной и изменением параметра, т. е. между изменением состояния и изменением поля, трудно переоценить. Именно различие этих двух видов изменений позволяет нам не смешивать изменения, образующие *само* поведение, с изменениями, образующими переход от одного поведения к другому (см. § 2.1). Я поясню это различие несколькими примерами.

В идущих часах отдельная переменная, измеряемая показанием минутной стрелки на циферблате, образует одномерную систему, определяемую состоянием, так как после нескольких наблюдений мы можем предсказать линию ее поведения, следующую за любым данным состоянием. Если теперь регулятор (параметр) перевести в иное положение, так что скорость хода

часов изменится, и исследовать систему вторично, то она снова окажется системой, определяемой состоянием, но имеющей иное поле.

Если эдоровый человек принимает внутрь 100 *г* глюкозы в водном растворе, содержание глюкозы в его крови обычно сначала повышается, а затем снижается, как показывает кривая *I* на фиг. 20. Отдельная переменная «уровень глюкозы в крови» не является переменной, определяемой состоянием, так как то или иное

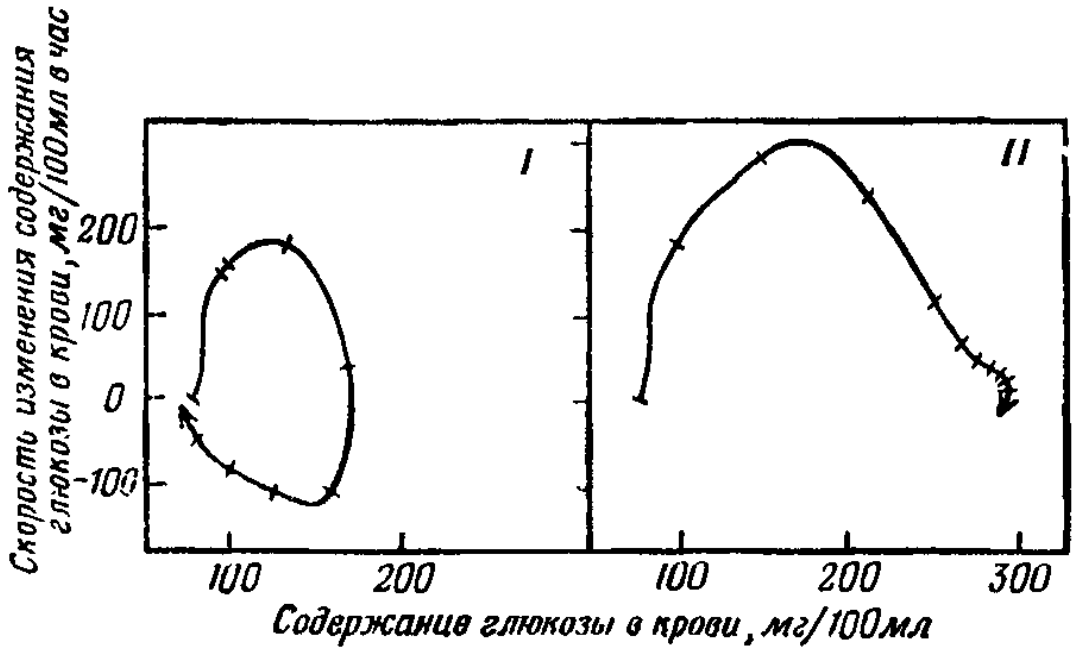


Фиг. 20. Изменения уровня глюкозы в крови после приема 100 *г* глюкозы у здорового человека (I) и у больного диабетом (II).

состояние (например, 120 *мг*/100 *мл*) не определяет последующего поведения: уровень глюкозы может повышаться или понижаться. Однако, добавив вторую переменную, а именно «скорость изменения уровня глюкозы в крови», которая может быть положительной или отрицательной, мы получим систему из двух переменных, для целей иллюстрации в достаточной мере определяемую состоянием. Поле этой системы будет сходно с полем *I* на фиг. 21. Но если человек страдает диабетом, то кривая содержания глюкозы в крови, даже при той же начальной величине, поднимается

гораздо выше (см. кривую *II* на фиг. 20). Поле этого поведения (фиг. 21,*II*) оказывается не таким, как у здорового человека. Таким образом, изменение величины параметра «степень диабетического расстройства» привело к изменению поля.

Гёрден и Каллер выработали условный рефлекс у собаки, находившейся под воздействием кураре (вещество, обладающее паралитическим действием). Позже,



Фиг. 21. Поля двух линий поведения, *I* и *II*, показанных на фиг. 20.

Поперечными черточками отмечены каждые четверть часа.

когда животное не находилось под воздействием кураре, условный рефлекс вызвать не удавалось. Но когда собаке снова ввели это вещество, рефлекс возвратился. Таким образом, здесь были две характерные линии поведения (две реакции на раздражитель), и одна из них проявлялась при высокой величине параметра «концентрация кураре в тканях», а другая — при его низкой величине.

Раздражители

6.5. Многие раздражители можно адекватно представить в виде изменения величины параметра, поэтому здесь уместно будет установить связь физиологического

и психологического понятия «раздражитель» с нашими методами.

Во всех случаях схема непосредственных воздействий будет такова:

(Экспериментатор)⟶ Раздражитель ⟶Животное ⟶ Регистрирующие приборы

В некоторых случаях на животное, находящееся в состоянии равновесия, воздействуют внезапным изменением состояния раздражителя и сохраняют это второе состояние в продолжение всего наблюдения. Например, когда демонстрируют реакцию зрачка на свет, то сначала дают глазу привыкнуть к слабому освещению, а затем внезапно усиливают освещение до высокого уровня, который поддерживают все время, пока происходит реакция. В таких случаях состояние раздражителя служит параметром для системы «животное и регистрирующие приборы», и производимое физиологом сравнение предшествующего «контрольного» поведения с поведением после воздействия раздражителя эквивалентно, в нашем методе, сравнению двух линий поведения, которые, начинаясь с одного и того же состояния, идут в двух полях, соответствующих двум значениям параметра «состояние раздражителя». В опытах такого типа изменение состояния раздражителя имеет характер ступенчатой функции (§ 7.13).

Иногда параметр внезапно изменяют и тотчас же возвращают к начальной величине — например, когда экспериментатор ударяет по сухожилию. Эффект изменения параметра состоит в кратковременном изменении поля, и это изменение, пока оно длится, выводит репрезентативную точку из ее первоначального положения. При возвращении параметра к исходной величине первоначальное поле и положение точки равновесия восстанавливаются, но репрезентативная точка теперь удалена от точки равновесия; поэтому она движется вдоль линии поведения, и организм «реагирует». (Обычно репрезентативная точка возвращается к прежнему состоянию равновесия, но если таких состояний

несколько, она может прийти к какому-либо другому равновесному состоянию.) Такой раздражитель мы будем называть **импульсным**.

В дальнейшем необходимо будет точнее указывать, чтó мы понимаем под «раздражителем» в каждом данном случае. Представим себе, например, собаку, у которой вырабатывают условный рефлекс на звук электрического звонка. Чтó именно здесь будет раздражителем? Может быть, замыкание контакта при включении звонка? Или частые удары молоточка по чашке звонка? Колебания воздуха? Вибрации барабанной перепонки, слуховых косточек, базальной мембраны? Импульсы в слуховом нерве, в слуховой зоне коры? Чтобы быть точными, мы должны признать, что экспериментатор непосредственно контролирует только замыкание контактов и что это служит параметром для комплексно действующей системы, состоящей из электрического звонка, среднего уха и прочих компонентов.

Когда «раздражитель» становится более сложным (при увеличении числа параметров, изменяемых экспериментатором), мы должны сделать неизбежные обобщения. При этом необходимо заметить, что если не все параметры независимы, если они изменяются группами (подобно переменным в § 3.3), мы можем представить каждую из групп отдельной величиной и тем избежать излишней многочисленности параметров.

Соединение динамических систем

6.6. Теперь мы можем объяснить, чтó, по существу, имеется в виду под «соединением» двух (или большего числа) систем.

Представление о соединенных системах имеет величайшее значение в биологии, где оно часто играет основную роль. Мы сталкиваемся с ним всякий раз, когда одна система действует на другую, сообщается с ней, принуждает ее к чему-либо или передает ей сигналы.

(Природу операции соединения можно строго и наиболее ясно представить в математической форме (§ 21.9), так как это позволяет видеть, что́ существенно и что́ не относится к сути дела. Детально этот вопрос обсуждается во «Введении в кибернетику», § 4/6, здесь же мы рассмотрим его менее строго.)

Для того чтобы две системы, скажем A и B, были соединены и A действовала на B, необходимо, чтобы система A влияла на состояние системы B. Другими словами, величины каких-то параметров системы B (или хотя бы одного параметра) должны стать функциями от величин переменных системы A (зависеть от них). Так, например, если B — яйцо, развивающееся в инкубаторе, а A — атмосферное давление, то A можно «соединить» с B так, чтобы A влияло на B, если сделать температуру (или другой подходящий параметр) зависящей от давления.

В этом примере мы не видим, как можно было бы заставить развитие яйца влиять на атмосферное давление, так что обратное соединение систем A и B ($B \to A$) вряд ли возможно. В большинстве случаев, однако, возможно соединение в обоих направлениях. При таком соединении между двумя системами устанавливается обратная связь.

В очень простых случаях поведение целого, образуемого соединенными частями, можно шаг за шагом проследить с помощью логической или математической дедукции. Можно представить себе, что каждая часть имеет собственное фазовое пространство, заполненное полем; структура этого поля будет зависеть от положения репрезентативной точки другой части. Каждая репрезентативная точка совершает переход, определяемый ее собственным полем, форма которого зависит от положения второй точки. Таким образом, каждая из них перемещается шаг за шагом, будучи направляема другой точкой и в то же время направляя ее. (Этот процесс детально рассмотрен во «Введении в кибернетику, § 4/7.)

Картина этих изменений слишком сложна для того, чтобы наглядно представить себе, как будут вести себя

две реальные системы; детали должны быть установлены каким-либо другим методом. Важно то, что природа процесса в принципе совершенно свободна от неясностей или неопределенностей, и поэтому его можно включить в строгую теорию динамических систем.

Параметр и стабильность

6.7. Теперь мы подошли к главному пункту этой главы. Поскольку изменение величины параметра ведет к изменению поля и поскольку стабильность системы зависит от ее поля, *изменение величины параметра, как правило, ведет к какому-то изменению стабильности системы.*

Простым примером служит смесь водорода, азота и аммиака, в которой происходит процесс соединения или диссоциации, пока концентрации не достигнут равновесного состояния. Если смесь первоначально образовалась из чистого аммиака, то одна переменная «процент диссоциировавшего аммиака» образует одномерную систему, определяемую состоянием. К ее параметрам относятся, в частности, температура и давление. Как известно, изменения этих параметров влияют на положение равновесия.

Такая система проста и отвечает на изменения параметров лишь простым сдвигом равновесия. В общем случае дело обстоит сложнее. Изменение величины параметра может вести к любому изменению, которое может быть вызвано заменой одного поля другим,— к превращению стабильной системы в нестабильную, к сдвигу равновесия, к появлению множества точек равновесия вместо одной или к превращению их в циклы и т. д. Примером служит фиг. 68.

Здесь нас интересует только общая зависимость, которая является двусторонней: в системе, определяемой состоянием, *изменение стабильности может быть обусловлено только изменением величины параметра, а изменение величины параметра ведет к изменению стабильности.*

Равновесные состояния части и целого

6.8. В общем случае, как было показано в § 4.18, зависимость между стабильностью частей и стабильностью целого может быть весьма сложной и для ее исследования могут потребоваться специальные методы. Существует, однако, простая зависимость, которая будет для нас чрезвычайно полезна и которую легко описать.

Предположим, что мы соединяем между собой две части: A (с переменными u и v) и B (с переменными w, x и y). Если переменные части A имеют значения 7 и 2, а переменные части B — значения 3, 1 и 5, то целое, естественно, образует систему с пятью переменными u, v, w, x и y и в данном состоянии переменные целого имеют соответственно значения 7, 2, 3, 1 и 5.

Предположим теперь, что это состояние целого (7, 2, 3, 1, 5) — является его состоянием равновесия. Это значит, что переход из него будет переходом к тому же состоянию (§ 4.4). Следовательно, часть A, когда ее параметры равны 3, 1 и 5, переходит от (7, 2) к (7, 2), т. е. не изменяется. Таким образом, пребывание целого в состоянии равновесия при значениях переменных 7, 2, 3, 1, 5 означает, что состояние (7, 2) части A при значениях ее параметров 3, 1, 5 тоже должно быть равновесным, как и состояние (3, 1, 5) части B при значениях ее параметров 7, 2. Таким образом, пребывание целого в состоянии равновесия предполагает, что и каждая часть должна находиться в состоянии равновесия при условиях (значениях параметров), определяемых другими частями.

Верно и обратное рассуждение. Предположим, что часть A находится в равновесии в состоянии (7, 2), когда ее параметры имеют значения 3, 1, 5, и что часть B находится в равновесии в состоянии (3, 1, 5) при параметрах 7, 2. Из этого следует, что целое будет находиться в равновесии в состоянии (7, 2, 3, 1, 5), так как в этом состоянии ни A, ни B не могут изменяться.

Вывод: *для того чтобы динамическая система в целом находилась в равновесии в данном состоянии, необходимо и достаточно, чтобы каждая часть находилась в равновесии в этом состоянии при условиях, заданных ей другими частями.*

6.9. Предположим теперь, что целое, образованное соединением частей, движется вдоль некоторой линии поведения. Представим себе, что эта линия приводит к состоянию, которое является равновесным для одной части (при условиях, заданных в тот момент другими частями), но не равновесным для других частей. Изменение части, оказавшейся в равновесии, тотчас же прекратится; однако другие части, не достигшие равновесия, будут изменять свое состояние и тем самым изменять условия, в которых находится часть, достигшая равновесия. В результате изменения условий (значений параметров) состояние этой части перестанет быть равновесным, и «остановившаяся» часть снова придет в движение.

Очевидно, что при любом состоянии целого, если одна какая-либо часть не находится в равновесии (даже тогда, когда остальные достигли его), эта часть будет изменяться, создаст новые условия для других частей, приведет их тем самым в движение и таким образом не позволит целому находиться в состоянии равновесия. Так как для равновесия целого необходимо, чтобы *все* части находились в равновесии, мы можем сказать (метафорически), что каждая часть обладает *правом вето* в отношении равновесных состояний целого.

6.10. Значение этого факта состоит в том, что благодаря ему каждая часть *избирательно* ограничивает набор возможных равновесных состояний целого. Начиная с гл. 1, мы искали фактор, который действовал бы «механистически» и в то же время избирательно. В следующей главе этот фактор будет показан в действии.

Глава 7

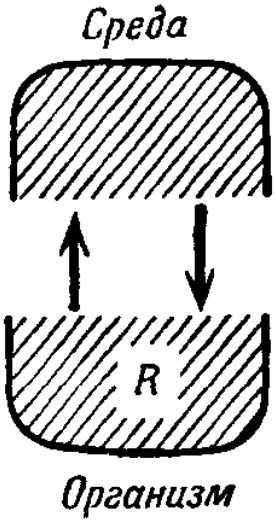
УЛЬТРАСТАБИЛЬНАЯ СИСТЕМА

7.1. Теперь мы собрали фонд необходимых понятий. Все они определены как отношения между первичными операциями, так что они вполне объективны и удовлетворяют требованиям, сформулированным в § 2.10. Мы можем теперь вновь рассмотреть основную проблему, поставленную в § 5.14, и можем попытаться выяснить, что́ лежит в основе того факта, что котенок, обладавший мозговым механизмом, который обусловливал неадаптивное поведение, приобретает механизм, благодаря которому поведение становится адаптивным.

Необходимые предпосылки адаптации

7.1. Согласно § 3.11, котенка и окружающую его среду следует рассматривать как взаимодействующие системы; поэтому схема непосредственных воздействий будет выглядеть как фиг. 22. (Эта схема сходна с изображенной на фиг. 18, только здесь тонкая сеть связей, в действительности существующих в среде и в организме, представлена сплошной штриховкой.) Стрелки, идущие к R и от R, соответствуют, конечно, сенсорным и двигательным каналам. Часть R принадлежит организму, но определена здесь в чисто функциональном отношении; на этом этапе всякая попытка отождествить R с анатомическими или гистологическими структурами требует осторожности. R мы определяем как *систему*, которая действует, когда котенок реагирует на огонь, т. е. как часть, ответственную за внешнее поведение,

Далее мы исходили из того (§ 5.14), что котенок способен к разнообразным реакциям, из которых одни «ошибочны», другие «правильны». Это разнообразие реакций, согласно § 6.3, указывает на то, что какие-то параметры (назовем их S) могут иметь различную величину, т. е. не фиксированы раз навсегда. Поскольку первичное действие этих параметров состоит в изменении поведения котенка (и только вторичные эффекты затрагивают среду), очевидно, что они непосредственно



Фиг. 22.

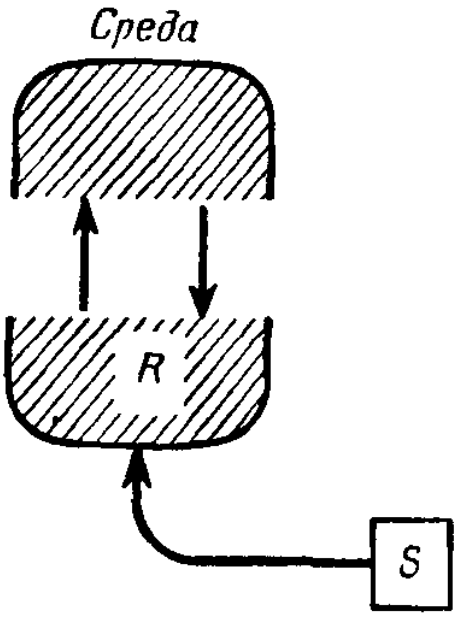
действуют на R, но не на среду. Таким образом, мы получаем схему, изображенную на фиг. 23. Согласно § 6.3, число возможных различных значений S должно быть по меньшей мере равно числу различных форм поведения (как адаптивных, так и неадаптивных), которые возможны для R.

7.3. Теперь нужно ввести существенные переменные. Что влияет на них? Ясно, что на них должно что-нибудь влиять, ибо нас не интересует случай, когда организму ничто не угрожает и поэтому он бессмертен. На существенные переменные могли бы влиять среда, R или то и другое.

Наиболее интересен тот случай, в котором на существенные переменные непосредственно воздействует только среда. Это делает проблему, стоящую перед котенком, максимально трудной и близкой к действительности. Таков случай, когда из огня падает горячий

уголек, который катится по направлению к котенку: среда угрожает прямым воздействием на существенные переменные, так как, если головной мозг ничего не предпримет, котенок получит ожог. Таков же случай, когда организм животного в пустыне теряет воду под действием тепла; если животное ничего не предпримет, оно погибнет от жажды.

Прямое действие R на существенные переменные было бы целесообразным, если бы головной мозг



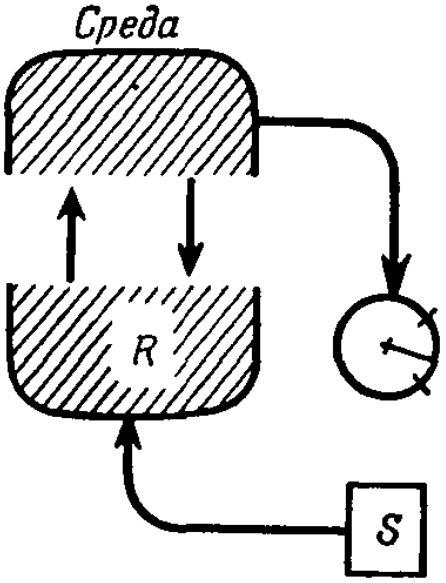
Фиг. 23.

котенка мог своей деятельностью превратить его из организма, который не должен подвергаться ожогам, в организм, которому ожоги полезны! (Такая смена цели, возможно, играет большую роль в высших проявлениях мозговой функции, когда предварительно может быть поставлена *подчиненная цель* или произведено ее изменение; но этого не бывает на том основном уровне, который мы сейчас исследуем, и мы не будем рассматривать таких возможностей.)

Теперь схема непосредственных воздействий приобретает форму фиг. 24. Совокупность существенных переменных представлена циферблатом со стрелкой и с двумя предельными отметками, означающими физиологические границы (поскольку для нас важно, находятся

ли величины этих переменных в физиологических границах).

7.4. Продолжая исследовать наиболее трудный для котенка вариант, рассмотрим тот случай, когда возможное воздействие различных состояний среды на существенные переменные (хотя оно и детерминировано) остается неизвестным реагирующей части R. Так обстояло бы дело с птицей, которая, попав на чужой для



Фиг. 24.

нее остров, видит незнакомую ягоду и не знает, ядовита она или нет. Так же обстоит дело с находящейся в клетке Торндайка кошкой, которая не знает, вправо или влево нужно потянуть рычаг, чтобы дверца открылась. Именно такое предположение было сделано в § 1.17, где мы взяли котенка перед огнем в качестве примера ситуации, в которой прошлый опыт организма не дает никаких надежных указаний на связь различных состояний среды с состоянием существенных переменных, т. е. не позволяет решить, находятся ли они «внутри» или «вне» физиологических границ.

Для того чтобы быть адаптированным, организм, руководствуясь информацией из внешней среды, должен регулировать свои существенные переменные, вводя их в надлежащие границы путем таких воздействий на среду (осуществляемых с помощью двигательных реакций), в результате которых среда должным

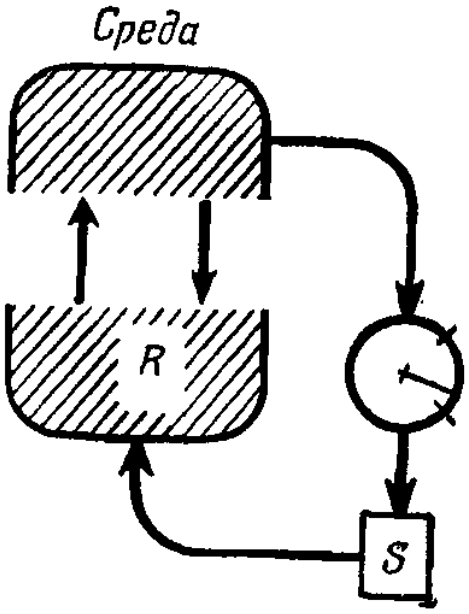
образом влияет на эти переменные. Поэтому схема непосредственных действий для этого процесса такова:

В рассматриваемом случае реагирующая часть R никак специально не связана и не согласована с событиями в окружающей среде и их возможным влиянием на существенные переменные. Таким образом, реагирующую часть R можно представлять себе как организм, пытающийся контролировать величины на выходе «черного ящика» (среды), содержимое которого не известно ему.

Можно принять за аксиому (для *всякого* «черного ящика», когда диапазон его входных величин *дан* нам), что единственный способ, позволяющий выяснить природу его содержимого, состоит в передаче действий через него. Это означает, что нужно задавать входные величины, наблюдать выходные величины и регистрировать отношения между первыми и вторыми. В нашем основном примере это значит, что котенок должен *совершать различные действия* по отношению к среде и в дальнейшем вести себя в соответствии с тем, как эти действия сказываются на существенных переменных. Иными словами, он должен действовать методом проб и ошибок.

В психологических работах адаптацию путем проб и ошибок иногда рассматривают как лишь один из способов адаптации, и к тому же не самый лучший. Приведенные выше соображения показывают, что метод проб и ошибок занимает гораздо более фундаментальное положение среди методов адаптации. Они, в сущности, показывают, что тогда, когда организм должен приспосабливаться (удерживать свои существенные переменные в физиологических пределах), действуя через среду типа «черного ящика», процесс проб и ошибок *необходим*, ибо только такой процесс позволяет извлечь нужную информацию.

Таким образом, процесс проб и ошибок можно рассматривать с двух совершенно разных точек зрения. С одной стороны, в нем можно видеть просто попытку достижения цели; когда цель не достигается, эффективность его мы оцениваем цифрой 0. С такой точки зрения это лишь «второсортный» способ достижения цели. Существует, однако, другая точка зрения, которая ставит этот метод неизмеримо выше, так как он может



Фиг. 25.

играть неоценимую роль в *получении информации*, абсолютно необходимой для успешной адаптации. Именно поэтому процесс проб и ошибок *должен* быть использован котенком при адаптации.

7.5. Так как котенок действует путем проб и ошибок, его окончательно выработанное поведение будет зависеть от результата этих проб — от того, как они влияли на существенные переменные. Иными словами, существенные переменные должны влиять на то, какое поведение будет выработано у котенка; а это означает, что в схеме непосредственных воздействий должен существовать канал *от существенных переменных к параметрам* S, т. е. схема будет выглядеть как фиг. 25. Таким образом, организм, способный к адаптации, имеет двигательный выход в среду и *две* цепи обратной связи. Первая цепь была показана на фиг. 22; она

состоит из обычного сенсорного ввода через органы зрения, слуха, мышечные рецепторы и т. д., дающего организму неэффективную информацию об окружающем мире. Вторая обратная связь проходит через существенные переменные (в том числе такие коррелирующие переменные, как состояние болевых рецепторов, см. § 3.15); она несет информацию о том, выходят ли существенные переменные из нормальных пределов, и воздействует на параметры S. Первая обратная связь играет свою роль *внутри* каждой реакции, а вторая определяет, какая именно реакция должна произойти.

7.6. Поскольку этот вопрос имеет решающее значение, рассмотрим его в деталях, пользуясь основными понятиями, рассмотренными в §§ 2.7—2.10.

Мы начинаем с того обычного факта, что котенок, однажды обжегшись, боится огня. В принятой нами форме это наблюдение будет описано так:

1) когда существенные переменные находятся *в своих пределах*, внешнее поведение (части R) таково, каким оно бывает при параметрах, имеющих значения S_1;
2) когда существенные переменные *выведены за эти пределы* (т. е. котенок обжегся), внешнее поведение таково, каким оно бывает при параметрах, имеющих значения S_2.

Изменение внешнего поведения показывает, что S_2 отличается от S_1. Таким образом, два разных значения существенных переменных привели к разным значениям S; следовательно, имеет место *прямое влияние существенных переменных на параметры* S.

7.7. Теперь эти же факты дадут нам необходимую информацию о том, что́ происходит во второй петле обратной связи, т. е. как существенные переменные влияют на параметры.

Основное правило адаптации путем проб и ошибок состоит в следующем. Если проба не достигла цели, поведение должно быть изменено; тогда и только тогда, когда цель достигнута, форма поведения должна быть закреплена. Посмотрим теперь, что́ представляет собой

система S и как она должна вести себя. В этой системе находятся переменные, идентичные параметрам для R (мы только изменили их название), и для этой системы существенные переменные служат параметрами, т. е. входными величинами. Основное правило можно сформулировать следующим образом:

1. Когда существенные переменные находятся вне своих нормальных пределов (т. е. когда проба не достигла цели), *ни одно* состояние S не должно быть равновесным (так как, согласно правилу, S должно перейти к какому-то другому состоянию).

2. Когда все существенные переменные находятся *внутри* своих нормальных пределов, *любое* состояние S должно быть равновесным (т. е. S должно находиться в безразличном равновесии).

7.8. Те условия, которые мы вывели до сих пор в этой главе, являются *необходимыми*. Иными словами, любая система, обладающая существенными переменными с заданными пределами и способная к адаптации путем испытания различных форм поведения с точки зрения конечного действия каждой из них на существенные переменные, должна иметь вторую обратную связь, формально тождественную с описанной нами (изоморфную ей). Этот вывод одинаково относится как к живому, так и к механическому мозгу.

Для полной ясности этого вопроса рассмотрим обратный случай. Предположим, оказалось бы, что какой-нибудь новый вид организмов или новый механический мозг всякий раз переходит из неадаптированного состояния в адаптированное (§ 5.7) даже тогда, когда он встречается с совершенно новыми ситуациями; и предположим, что вопреки всему сказанному выше исследование неопровержимо доказало бы, что второй обратной связи описанного типа не существует; что мы могли бы тогда сказать?

Остаются, по-видимому, только две возможности. Либо мы должны допустить, что есть какой-то еще не известный (несмотря на все исследования) канал, что и было предположено после опытов Герца (§ 4.13), либо

нам придется признать естественным, что переменные системы S приобретают правильные значения, хотя система и не получила надлежащей входной информации. Вторую возможность не мог бы допустить никто: с таким же основанием экзаменатор мог бы признать естественным, что студент дает правильные ответы, еще не получив вопросов! Если мы отвергнем эту возможность, нам остается только предположить, что *должен* существовать, в той или иной форме, второй канал информации.

Следствия двойной обратной связи

7.9. Теперь полезно будет рассмотреть связь между адаптивным поведением и механизмом адаптации с противоположной точки зрения. До сих пор в этой главе мы принимали факты адаптивного поведения как нечто данное и делали выводы о лежащих в их основе механизмах. Возьмем теперь механизм и спросим себя: если дан подобный механизм, в какой бы то ни было материальной форме, то будет ли он непременно обнаруживать адаптивное поведение? Этот вопрос мы будем рассматривать в оставшейся части настоящей главы и в следующей главе.

7.10. Чтобы начать с самого начала, нужно сделать ясными исходные предположения; с этого момента и до конца главы мы будем предполагать только то, что будет прямо оговорено.

Мы принимаем, что перед нами некоторая система, для которой схема непосредственных воздействий имеет вид, изображенный на фиг. 25. Нам дано, что какая-то переменная (или несколько переменных), называемая «существенной», действует на систему S таким образом, что если эта переменная (или все они) находится в заданных пределах, то S не изменяется; но если она находится вне этих пределов, то S все время изменяется. (Предполагается, что для S возможно достаточное число различных значений и ее изменение не сводится,

например, к циклическим повторениям.) Система, называемая «средой», взаимодействует с реагирующей системой R. Среда оказывает какое-то действие на переменную, называемую «существенной», а S каким-то образом действует на R. Если дано только это и ничего больше, следует ли, что система R, вначале действовавшая неадаптивно по отношению к среде, изменится таким образом, что будет действовать адаптивно? (Сейчас я не хочу вводить никаких дополнительных предположений; в особенности я не хочу ограничивать общность случая предположением о том, что R состоит из частей типа нейронов.)

7.11. Поскольку целое состоит из двух соединенных частей — из среды и реагирующей части R, с одной стороны, и из существенных переменных и S — с другой, мы можем использовать «теорему вето» из § 6.9. Согласно этой теореме, состояниями равновесия для целого могут быть только такие состояния, которые будут равновесными как для существенных переменных, так и для S. Но часть S находится в равновесии только тогда, когда существенные переменные не выходят из заданных пределов. Следовательно, при всех возможных равновесных состояниях целого существенные переменные находятся в заданных пределах. Таким образом, если целое после какого-то начального состояния движется вдоль соответствующей линии поведения и приходит к равновесию, *это равновесие всегда окажется адаптивным*.

Итак, мы пришли к решению проблемы, поставленной в конце гл. 1; в § 7.8 мы показали, что данный механизм необходим, а в § 7.11— что он достаточен.

7.12. Это решение, однако, чрезвычайно абстрактно и оставляет без ответа множество дополнительных вопросов, возникающих в связи с нашей проблемой. Кроме того, оно не дает нам никакого наглядного или интуитивного представления о том, что́ происходит при функционировании системы (например, такой сложной системы, как организм человека). Поэтому остальная часть этой книги будет посвящена более детальному рассмот-

рению многочисленных следствий и частных сторон нашего решения.

Здесь, однако, возникает трудность. Нам нужно проследить, в абстрактной или наглядной форме, действительные события, происходящие в целостной системе, когда среда ставит задачи перед существенными переменными (угрожая вывести их из нормальных пределов), когда величины S определяют тот или иной вид поведения части R, когда R осуществляет это поведение, непрерывно взаимодействуя со средой, когда результат сказывается на существенных переменных и S изменяется (или, быть может, не изменяется), когда R переходит к новому поведению и т. д. Все это может оказаться чрезвычайно сложным и трудным для теоретического представления, если все переменные в среде R и S изменяются непрерывно, т. е. путем бесконечно малых сдвигов.

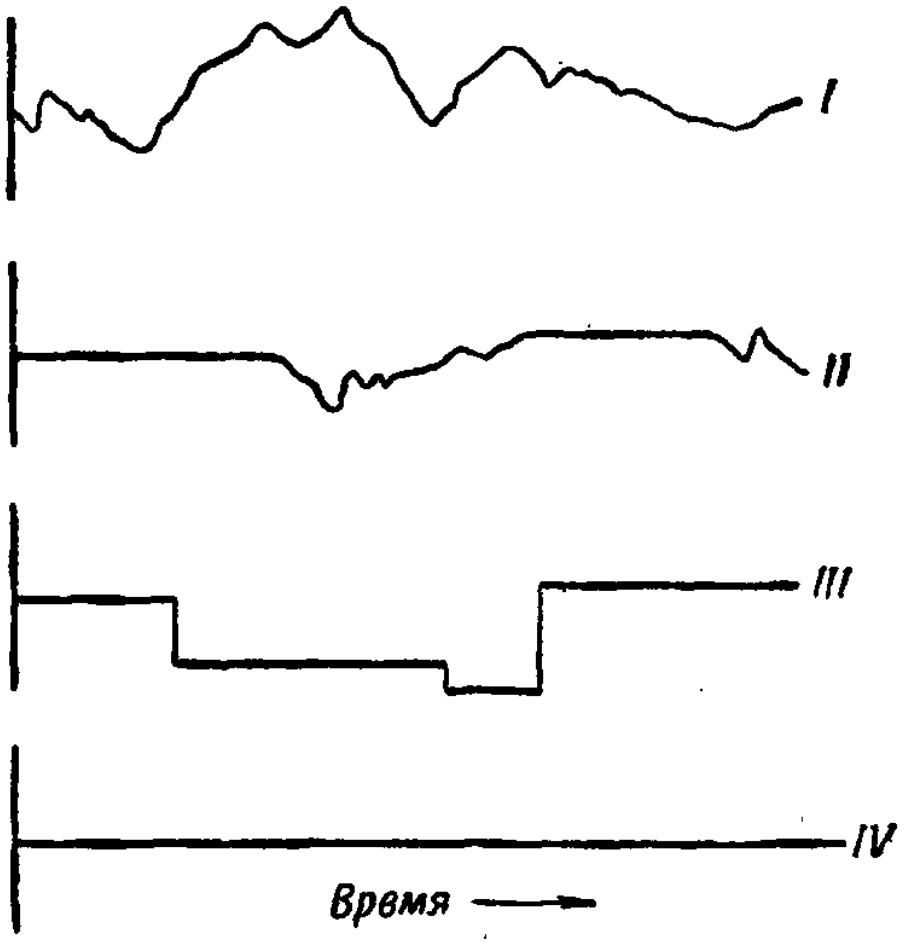
Опыт показал, что поведение всей системы и его физиологические и психологические предпосылки и следствия гораздо легче представить себе и понять, если исследовать частный случай, в котором все переменные среды и R изменяются непрерывно, а переменные S— дискретно (т. е. конечными скачками, которые разделены конечными интервалами). В § 9.4 будут приведены данные, позволяющие предполагать, что такие дискретные переменные, вероятно, действительно имеют иногда реальное значение; однако сейчас мы будем считать, что выбрали их просто ради удобства.

Ступенчатые функции

7.13. Иногда поведение переменной (или параметра) может быть описано без упоминания причин данного поведения: если мы говорим, что переменная или система ведет себя как «простой гармонический осциллятор», то значение этой фразы вполне понятно. В нашей книге нас будет больше интересовать степень постоянства той или иной переменной. Можно различать четыре типа

поведения переменной, примеры которых приведены на фиг. 26.

I. **Полная функция** — функция, которая не может быть постоянной на конечном интервале; к этому типу относятся многие обычные физические переменные, например атмосферное давление.



Фиг. 26. Типы поведения переменной.
I — полная функция; *II* — частично постоянная функция; *III* — ступенчатая функция; *IV* — постоянная функция.

II. **Частично постоянная функция** — функция, которая на некоторых конечных интервалах изменяется, а на некоторых постоянна; эта функция будет подробнее рассмотрена в § 12.18.

III. **Ступенчатая функция** — функция, которая на отдельных интервалах постоянна, а от интервала к интервалу меняет свое значение скачком.

IV. Наконец, для полноты следует упомянуть **постоянную функцию**, не претерпевающую никаких изменений на протяжении всего периода наблюдения. Очевидно, что эти четыре типа включают все возможные

случаи, кроме смешанных форм. Рассмотрев фиг. 1, можно видеть, что на этом графике изображены (сверху вниз) частично постоянная, полная и ступенчатая функции.

Во всех случаях предполагается, что принадлежность переменной к тому или иному типу относится только к периоду наблюдения: все, что могло бы иметь место в другое время, для нас несущественно.

Иногда физические явления не так легко отнести к определенному типу. Например, музыкальный тон постоянной громкости можно рассматривать либо как нечто, не изменяющее своей интенсивности,—следовательно, как постоянную функцию, либо как нечто, связанное с непрерывно движущимися частицами воздуха,— следовательно, как полную функцию. Во всех таких случаях неясность сразу же исчезнет, если мы перестанем думать о реальном физическом объекте с его многообразными свойствами и выберем ту переменную, которая нас в данный момент интересует.

7.14. Ступенчатые функции широко распространены в природе, хотя сама простота их свойств делает их менее заметными. «Ту вещь, что движется, скорей уловит взгляд, чем ту, которая в покое пребывает». Приводимые ниже примеры показывают повсеместное распространение ступенчатой функции.

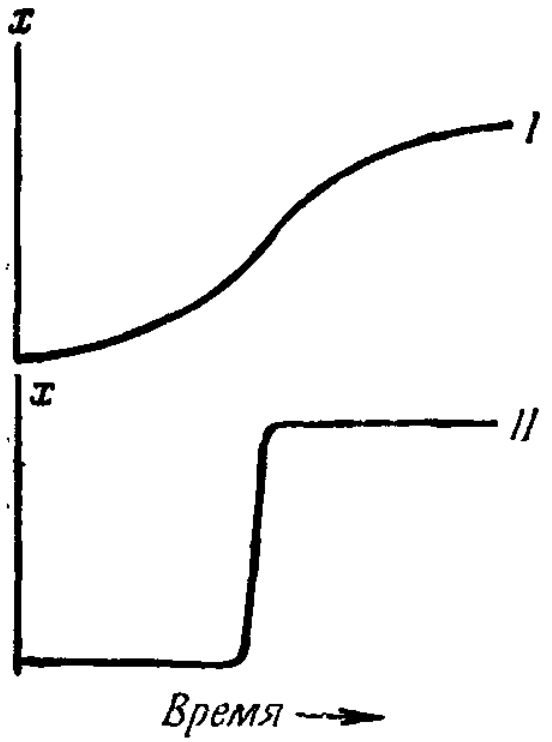
1. Электрический выключатель имеет *сопротивление*, которое остается постоянным все время, за исключением тех моментов, когда оно изменяется внезапным скачком.
2. *Электрическое сопротивление* плавкого предохранителя тоже определенное время сохраняет постоянную низкую величину, а затем внезапно изменяется, становясь очень высоким.
3. Когда мы растягиваем кусок резины, создаваемое им тянущее усилие приблизительно пропорционально его длине. *Коэффициент пропорциональности* имеет определенную постоянную величину, если только резину не растянуть так сильно, что она разорвется.

Когда это произойдет, коэффициент пропорциональности внезапно становится равным нулю, т. е. изменяется как ступенчатая функция.

4. **При добавлении сильной кислоты к незабуференному щелочному раствору изменение pH имеет форму, близкую к ступенчатой функции.**
5. Когда спирт медленно, при помешивании, добавляют к водному раствору белка, изменение *количества осажденного белка* тоже имеет форму, близкую к ступенчатой функции.
6. При изменении pH изменение *количества адсорбированного вещества* часто описывается примерно ступенчатой функцией.
7. Согласно принципам квантовой физики, многие *атомные* и *молекулярные переменные* изменяются по типу ступенчатой функции.
8. **Такую форму поведения обнаруживает всякая переменная, изменяющаяся по типу «все или ничего», если каждое из ее двух значений сохраняется в течение конечного интервала времени.**

7.15. Возможность представить реальную переменную ступенчатой функцией зависит обычно от метода наблюдения, а иногда и от применяемых приборов. На практике наблюдатели и приборы не регистрируют величины одновременно в течение очень коротких и очень длинных отрезков времени. Например, если полеты пчелы за медом изучаются на протяжении одного дня, наблюдатель обычно не прослеживает деталей каждого взмаха ее крыльев, как не учитывает он и изменений, связанных с тем, что пчела за день работы становится несколько старше. Он игнорирует изменения в положении крыльев как слишком быстрые (для него заметен лишь их средний результат), а возрастные изменения — как слишком медленные (он считает возраст приблизительно постоянной величиной). Таким образом, в общем случае нельзя решить, изменяется ли переменная реального объекта как ступенчатая функция, пока не указаны детали метода наблюдения.

Это различие иллюстрирует фиг. 27, где изображен график $x=\text{th}\,t$. При наблюдении в течение короткого промежутка времени (от $t=-2$ до $t=+2$) кривая имеет форму I, явно несходную с формой ступенчатой функции. Но если на графике отражен интервал от $t=-100$ до $t=+100$, получается кривая II, приближающаяся по форме к ступенчатой функции.



Фиг. 27. Одно и то же изменение, наблюдаемое в течение двух различных промежутков времени: в первом случае (I) период наблюдения в 20 раз короче, чем во втором (II).

7.16. В качестве второго примера рассмотрим обычное телеграфное реле. При ежесекундной регистрации изменение проводимости его контактов будет изображаться кривой, почти точно совпадающей с кривой ступенчатой функции. Если, однако, мы будем регистрировать процесс на протяжении микросекунд, то изменение окажется гораздо более плавным, так как теперь можно будет заметить, что контакты ускоряют и замедляют свое движение и подскакивают, описывая плавную непрерывную траекторию. А если реле наблюдать

в течение многих лет и вычертить кривую средней проводимости, то эта кривая не будет иметь вид горизонтальной прямой, а будет постепенно снижаться по мере окисления и износа контактов.

Здесь перед нами еще один пример, подтверждающий, что указание на реальный объект не определяет однозначным образом систему или тип поведения (см. § 2.4 и § 6.2). Вопрос «представляет ли собой поведение телеграфного реле *в действительности* ступенчатую функцию?» поставлен неправильно, так как относит к реальному объекту то, что определяется только системой, которая должна быть точно указана. (К этому предмету мы вернемся в § 9.10.)

7.17. Поведение в форме ступенчатой функции весьма вероятно во всех тех случаях, когда мы наблюдаем «машину» с быстродействующими частями. Например, если мы будем случайным образом изменять регулировку неизвестной нам электронной машины, то можно ожидать, что время от времени будут происходить внезапные изменения, имеющие характер ступенчатой функции, причем эта внезапность обусловлена скоростью свойственных машине изменений.

Причину этого проще всего пояснить на примере фиг. 8. Предположим, что кривизна поверхности контролируется параметром, заставляющим точку A подниматься, а точку B — опускаться. Если шарик находится в покое в точке A, то сначала изменение параметра не вызывает никакого изменения в положении шарика по горизонтали: он останется в покое в точке A (хотя будет медленнее реагировать в случае его смещения). При дальнейшем изменении параметра шарик будет оставаться в точке A, пока A и B не окажутся на одном уровне. Он и тогда не сдвинется с места. Но если параметр будет продолжать изменяться и A окажется выше B, то (при достаточной силе тяжести и большой подвижности шарика) шарик внезапно перейдет в точку B. Здесь он и останется при любом дальнейшем повышении A и понижении B. Таким образом, при постепенном изменении параметра положение шарика в гори-

зонтальной плоскости будет изменяться по типу ступенчатой функции, и приближение к этой функции будет тем большим, чем быстрее движется шарик при данном наклоне поверхности.

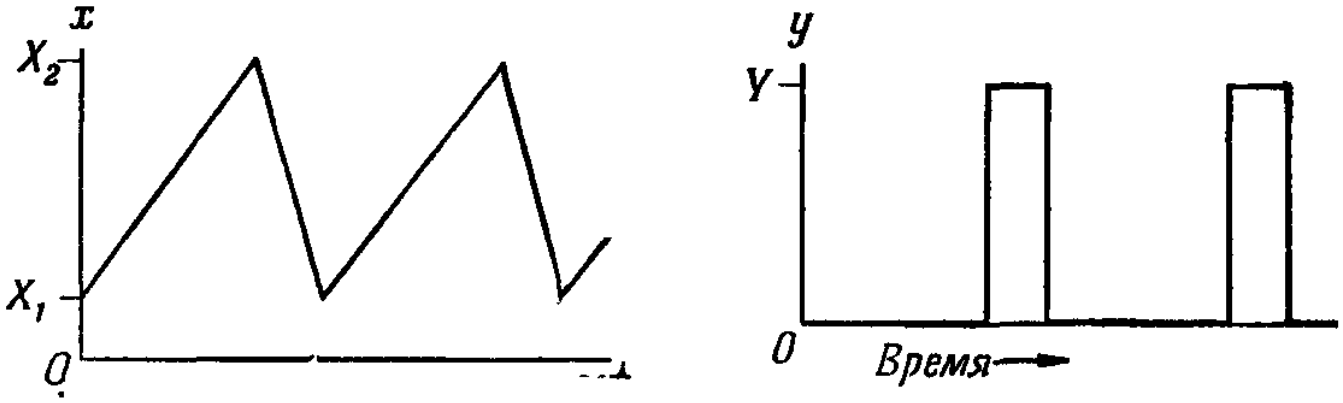
Дальнейшее исследование этих возможностей излишне, так как они не могут служить основой для каких-либо точных выводов. Мы хотели только показать, что ступенчатые функции весьма обычны, когда наблюдаемая система содержит быстродействующие компоненты. Этого вопроса мы еще раз коснемся в § 9.8.

7.18. В любой системе, определяемой состоянием, поведение переменной в каждый момент зависит от значений этой и других переменных в данный момент (§ 2.15). Правило сохраняет силу и тогда, когда одна из переменных ведет себя как ступенчатая функция: сохранит ли она прежнюю величину или подвергнется изменению, будет зависеть как от ее собственной величины, так и от величин других переменных. Если дана определяемая состоянием система со ступенчатым механизмом [1], функция которого имеет в данный момент определенную величину, то все состояния системы при этой величине его функции можно разделить на два класса: состояния, приводящие к изменению величины функции ступенчатого механизма, и состояния, не приводящие к такому изменению. Первые являются критическими состояниями системы: стоит только наступить какому-либо из них, как ступенчатая функция изменит величину. Критическое состояние плавкого предохранителя характеризуется той силой тока, при которой он перегорает. Критическое состояние растягиваемого куска резины — это та длина, при которой он разрывается.

Примером из области физиологии может служить мочевой пузырь, у которого после высокой перерезки спинного мозга выработалась способность к автоматиче-

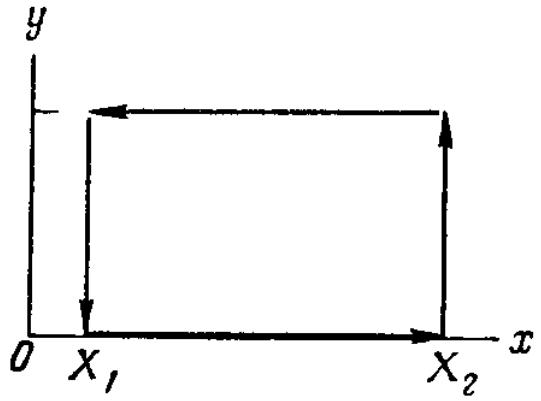
[1] Я признателен д-ру Дж. О. Уисдому за мысль о том, что механизм, поведение которого описывается в основном ступенчатой функцией, удобно было бы называть «ступенчатым механизмом».

скому периодическому опорожнению. В пузырь непрерывно поступает моча, но вначале спинномозговые центры мочеиспускания бездействуют. Когда объем мочи достигает определенной величины, центры приходят в действие и моча выводится. Когда объем мочи



Фиг. 28. Схема изменений объема мочи в мочевом пузыре (x) и активности центра мочеиспускания (y) у животного с перерезанным спинным мозгом.

снижается до определенной величины, активность центров прекращается и мочевой пузырь начинает снова наполняться. График для двух переменных был бы похож на фиг. 28. Они образуют систему, определяемую



Фиг. 29. Поле изменений, показанных на фиг. 28.

состоянием, так как она имеет поле, изображенное на фиг. 29. Переменная y ведет себя приблизительно как ступенчатая функция. Когда она равна 0, критическим состоянием будет $x=X_2$, $y=0$, так как наступление этого состояния ведет к скачку от 0 к Y. Когда она равна Y, критическим состоянием будет $x=X_1$, $y=Y$, так как это состояние ведет к скачку от Y к 0.

7.19. Всякая машина обладает свойством «портиться», которым в теории часто пренебрегают. Но это событие ни в каком смысле не «противоестественно», так как оно подчиняется основным законам физики и химии и его поэтому можно предсказать, зная непосредственно предшествующее состояние машины. Как правило, «порча» машины означает, что репрезентативная точка пришла к какому-то критическому состоянию и соответствующая ступенчатая функция изменила свое значение.

Как известно, почти всякая машина или физическая система разрушается, если ее переменные отходят достаточно далеко от своих обычных значений. Например, если мы заставим машину с движущимися частями работать все быстрее и быстрее, дело кончится механической поломкой; если в электрическом приборе все больше увеличивать напряжение или силу тока, произойдет пробой изоляции; перегрев машины приведет к расплавлению ее частей, при чрезмерном охлаждении могут произойти другие внезапные изменения, например конденсация пара, из-за которой паровая машина не будет работать при температуре ниже 100°С; в области химической динамики повышение концентрации может привести к насыщению раствора или к осаждению белков.

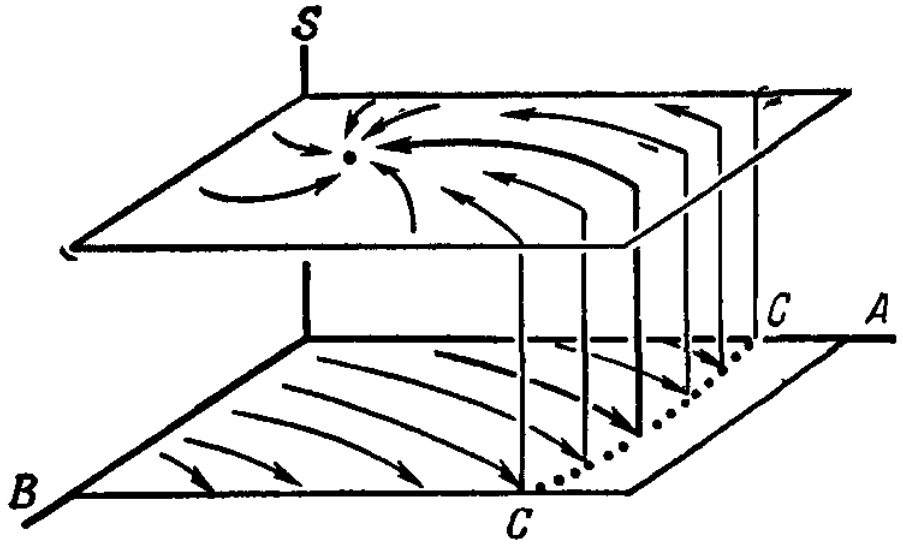
Здесь нет строгого правила, но вообще системам весьма свойственно обнаруживать изменения типа ступенчатой функции, когда их переменные выводятся далеко за свои обычные пределы. Позже (§ 9.7) мы будем говорить о том, что и нервная система, вероятно, не составляет в этом отношении исключения.

Системы, содержащие ступенчатые механизмы

7.20. Когда среди переменных системы, определяемой состоянием, имеется переменная, представляющая собой ступенчатую функцию, все поведение может

оказаться более простым, чем в том случае, когда все переменные — полные функции.

Предположим, что мы имеем систему с тремя переменными A, B, S; что она была исследована и оказалась системой, определяемой состоянием; что A и B — полные функции, а S — ступенчатый механизм. (Переменные A и B мы будем называть, как в § 21.7, главными переменными.) Фазовое пространство этой системы будет сходно с изображенным на фиг. 30 (где дана схема возможного поля). Как видно из схемы, фазовое пространство уже



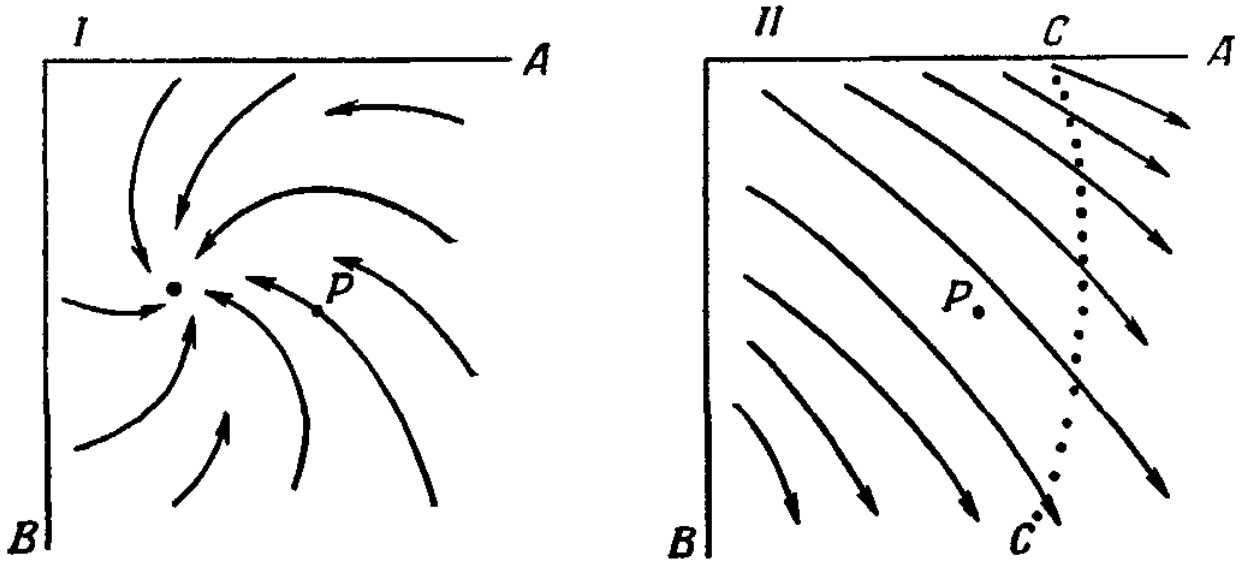
Фиг. 30. Поле определяемой состоянием системы из трех переменных, одна из которых (S) — ступенчатая функция.

Состояния на линии C — C являются критическими состояниями ступенчатой функции для линий поведения, проходящих в нижней плоскости

не заполняет всех трех измерений; поскольку S может принимать только дискретные значения, которых в данном случае (ради простоты) только два, фазовое пространство сводится к двум плоскостям, перпендикулярным оси S; каждая плоскость соответствует определенной величине S. Так как A и B — полные функции, репрезентативная точка будет двигаться в каждой из плоскостей по кривым, описывая линию поведения типа той, которая выделена жирными стрелками. Когда линия поведения доходит до линии критических состояний C—C, переменная S скачком переходит к другой величине и репрезентативная точка начинает двигаться вдоль жирной линии в верхней плоскости. В таком поле

движение репрезентативной точки везде определяется ее положением, так как число линий, выходящих из любой точки, никогда не превышает одной.

Если при исследовании соответствующей реальной «машины» мы будем, игнорируя S, многократно определять поле системы, состоящей из A и B (в то время как S может принимать то одно, то другое значение), то мы будем получать иногда поле I, а иногда поле II



Фиг. 31. Два поля системы, состоящей из переменных A и B. Точка P занимает одно и то же положение в обоих полях.

(фиг. 31) в зависимости от того, каким в данное время будет значение S.

Поведение системы AB, обладающей на первый взгляд двумя полями, следует сравнить с поведением системы, описанной в § 6.3: там использование двух значений одного параметра тоже вело к появлению двух полей. Но там изменение поля вызывалось произвольными действиями экспериментатора, заставлявшего параметр менять величину, здесь же изменение поля AB обусловлено внутренними механизмами самой «машины».

Теперь это свойство можно охарактеризовать в общих понятиях. Предположим, что в системе, определяемой состоянием, некоторые переменные обусловлены ступенчатыми механизмами и мы эти переменные игнорируем, остальные же (главные переменные) наблю-

даем во многих случаях и каждый раз строим их поле. Пока во время построения поля ни одна ступенчатая функция не изменяет свое значение, мы будем находить, что главные переменные образуют систему, определяемую состоянием, и имеют определенное поле. Но *в различных случаях поля могут оказаться различными.*

7.21. Эти соображения проливают свет на одну старую проблему теории механизмов.

Может ли «машина» быть детерминированной и в то же время способной к спонтанному изменению? Этот вопрос звучал бы противоречиво, если бы его задал один человек, но он действительно требует решения, потому что, говоря о живых организмах, одна школа утверждает, что они строго детерминированы, а другая — что они способны спонтанно изменяться. Можно ли примирить эти школы?

Если система, определяемая состоянием, содержит ступенчатые механизмы, то обе школы могут быть правы, при условии, что сторонники теории детерминации говорят о системе, включающей *все* переменные, а защитники возможности спонтанного изменения говорят только о главных переменных. Ибо вся система в целом, включая ступенчатые механизмы, имеет лишь одно поле и полностью определяется состоянием (подобно системе, представленной на фиг. 30). Но у системы главных переменных может быть столько разных форм поведения (ср. фиг. 31, *I* и *II*), сколько сочетаний могут образовать различные значения ступенчатых функций. И если ступенчатые механизмы недоступны для наблюдения, то переход от одного поведения главных переменных к другому будет казаться спонтанным, так как ни одно изменение или состояние главных переменных нельзя будет счесть его причиной.

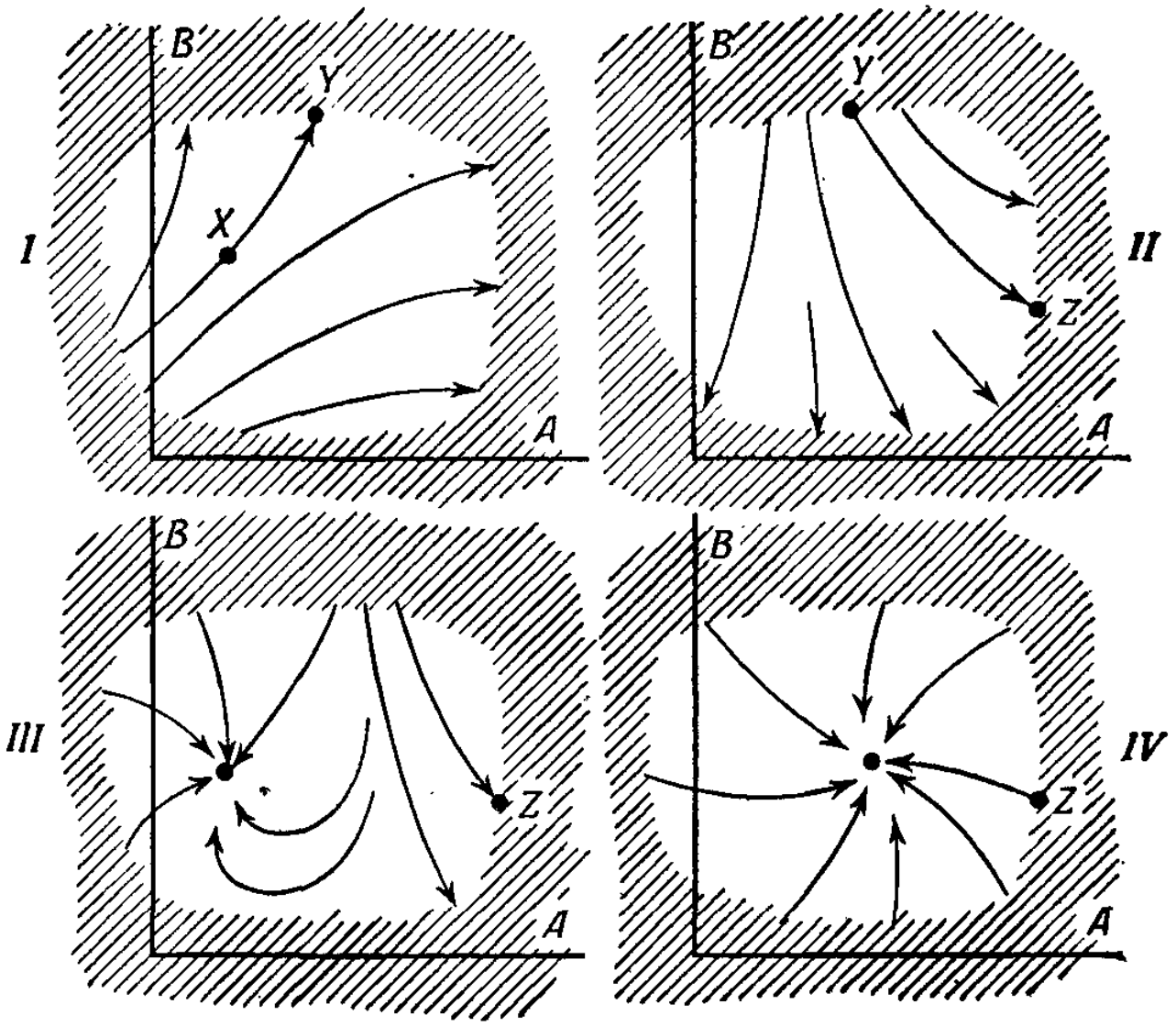
7.22. Если бы система содержала два ступенчатых механизма, в каждом из которых переменная могла бы иметь два значения, то существовало бы четыре поля главных переменных. В общем случае n ступенчатых механизмов, имеющих по два возможных состояния, дадут 2^n полей.

7.23. После этого отступления, касающегося ступенчатых функций, мы можем вернуться к системе с корректирующей обратной связью (§ 7.9) и рассмотреть ее поведение.

Чтобы установить соответствие понятий, мы примем, что главные переменные (изменяющиеся непрерывно) находятся в окружающей среде, в R и в комплексе существенных переменных, а ступенчатые функции — в S. Тогда их критические состояния будут распределены по тем областям фазового пространства главных переменных, в которых существенные переменные находятся вне своих нормальных пределов. Например, если бы главных переменных было только две (для удобства графического изображения), то такие области могли бы соответствовать заштрихованным участкам поля I на фиг. 32. Это означает, что физиологическое состояние организма удовлетворительно, если репрезентативная точка остается в пределах незаштрихованной области.

Предположим теперь, что первый набор значений ступенчатых функций S дает поле I (фиг. 32) и что репрезентативная точка находится в точке X. Линия поведения, идущая от X, нестабильна в «светлой» области, и репрезентативная точка движется по этой линии до границы области. Здесь (Y) она достигает критического состояния, и одна из ступенчатых функций изменяет величину; возникает новое поле, похожее, скажем, на поле II. Репрезентативная точка находится теперь в точке Y, но идущая отсюда линия тоже нестабильна в «светлой» области. Система следует по этой линии поведения и достигает критического состояния в точке Z, что приводит к изменению ступенчатой функции и возникновению нового поля (III). В этом поле уже есть состояние устойчивого равновесия, но из точки Z линия поведения уводит еще дальше от «светлой» области. Поэтому наступает еще одно критическое состояние, еще одна ступенчатая функция изменяет свое значение и возникает новое поле (IV). В этом поле линия поведения, идущая от Z, стабильна в отношении данной области, так что

репрезентативная точка приходит к состоянию равновесия и остается в нем. Критических состояний больше не возникает, ни одна ступенчатая функция не меняет своего значения, и поэтому никаких дальнейших изменений поля не происходит. Если после этого исследовать поле главных переменных, оно всегда будет



Фиг. 32. Изменения поля ультрастабильной системы.
Области критических состояний заштрихованы.

оказываться стабильным. Организм при умеренном выведении его из состояния равновесия будет возвращаться к нему, демонстрируя различные проявления адаптации, отмеченные в гл. 5.

7.24. Это стабильное поле и состояние равновесия при постоянных внешних условиях будут сохраняться бесконечно долго. Если теперь система будет время от времени подвергаться незначительным импульсным воздей-

ствиям (которые просто смещают репрезентативную точку, см. § 6.5), то целое будет всякий раз проявлять стабильность; эта реакция будет означать, что часть, принадлежащая организму, теперь обладает «адаптивным» механизмом для взаимодействия с частью, принадлежащей среде.

В предыдущем параграфе много говорилось о «пробах и ошибках» в процессе смены полей; поле *IV* явилось, по-видимому, лишь концом последовательного ряда «ошибок». При этом легко можно было потерять чувство пропорции; ведь в действительности для живущего и научающегося организма важно то, чтобы он мог много раз проявить приобретенную адаптацию. В самом деле, обстоятельства должны быть таковы, чтобы число случаев использования адаптации было достаточно большим, а число неудачных проб — достаточно малым, иначе для организма был бы бесполезен мозг, способный к научению.

7.25. Следует заметить, что для эффективности второй обратной связи не требуется никаких особых условий, касающихся конструкции реагирующей части R или последовательности значений S. Иными словами, механизм будет действовать и в том случае, если часть R первоначально была построена случайным образом или если величины S образуют случайную последовательность (значение фразы «построен случайным образом» разъяснено в § 13.1).

Такого рода случайность построения, вероятно, в известной степени имеет место в нервной системе, структурные единицы которой (дендриты, концевые разветвления, может быть, белковые молекулы) столь многочисленны, что никак не могут быть определены во всех деталях генотипом (§ 1.9). Поэтому при построении эмбрионального головного мозга некоторые из частных деталей, возможно, определяются случайными местными особенностями таких факторов, как концентрация кислорода или солей, местные механические напряжения и т. п. Если реагирующая часть R первоначально строилась именно таким образом, это не мешает

работе второй обратной связи: она приведет организм к адаптации.

Точно так же мы не делали никаких предположений о последовательности значений S (кроме того, что они не должны заметным образом коррелировать с событиями внутри поля). Поэтому любой некоррелирующий фактор может служить их источником, и они тоже могут быть в указанном смысле случайными.

Ультрастабильная система

7.26. В первом издании система, описанная в этой главе, была названа «ультрастабильной», и в § 8.6 мы покажем, чем оправдывается такое название. В то время мы считали эту систему уникальной, но дальнейшее исследование (см. «Введение в кибернетику», §§ 12/8—20) показало, что эта форма — лишь одна из большого класса родственных форм, среди которых она выделяется только тем, что с необычайной ясностью демонстрирует ряд особенностей, представляющих исключительный интерес для биологии. Слово «ультрастабильная» лучше сохранить в соответствии с подходом, изложенным в § 2.17, так как это ясно очерченная форма, вокруг которой можно вести обсуждение без какой-либо неопределенности и с которой можно связать множество сходных форм, встречающихся главным образом в живой природе.

Для удобства мы дадим формальное определение. Две системы непрерывно изменяющихся переменных («среда» и «реагирующая часть») взаимодействуют таким образом, что между ними существует первичная обратная связь (через сложные сенсорные и двигательные каналы). Вторая обратная связь, действующая прерывисто и со скоростью гораздо более низкого порядка, идет от среды к некоторым «непрерывным» переменным; последние в свою очередь влияют на определенные ступенчатые функции таким образом, что эти функции изменяют свою величину тогда и только тогда, когда

«непрерывные» переменные выходят из заданных пределов. Ступенчатые механизмы воздействуют на реагирующую часть; в качестве ее параметров они определяют, каким образом она будет реагировать на «среду».

(Из этого основного типа можно вывести множество вариантов. Их изучение значительно облегчается полным пониманием свойств основной формы, которую мы только что описали.)

7.27. У основной формы есть много интересных свойств, которых мы еще не касались. Однако их словесное описание может показаться скучным и неубедительным. Их лучше будет продемонстрировать на машине, устройство которой нам в точности известно и на которой мы можем наблюдать все, что происходит в различных условиях. (Мы можем называть ее либо «машиной, которая должна мыслить за нас», либо, что более принято,— «аналоговой вычислительной машиной».) Одна такая машина была построена и получила название «гомеостат». Ее устройство и поведение будут описаны в следующей главе.

Глава 8

ГОМЕОСТАТ

8.1. Ультрастабильная система гораздо богаче интересными свойствами, чем могло бы показаться на первый взгляд. Некоторые из этих свойств представляют особый интерес для физиолога и психолога, но для того, чтобы значение их для физиологии и психологии стало понятным, их нужно надлежащим образом продемонстрировать. С целью такой демонстрации была построена машина, сконструированная согласно определению ультрастабильной системы. Ее устройство и поведение будут описаны в настоящей главе [1].

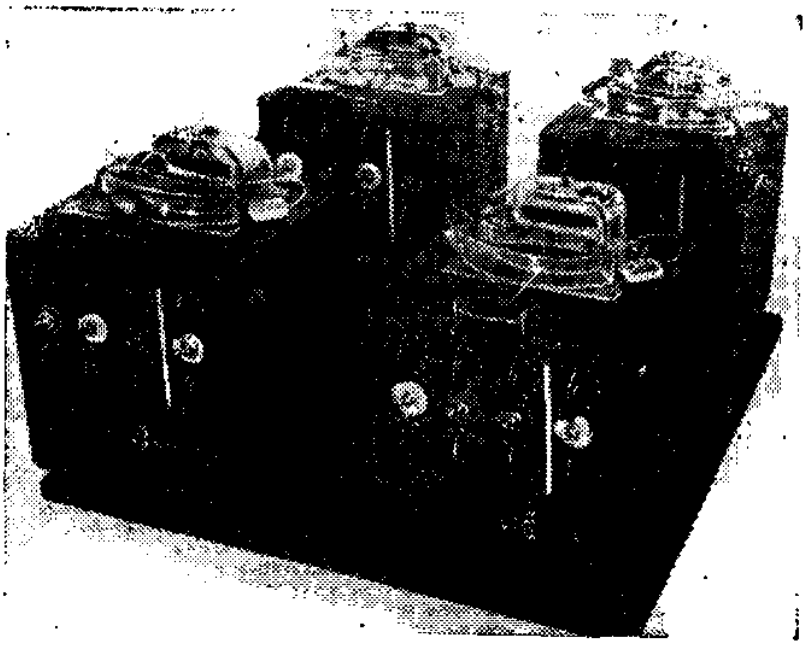
8.2. Гомеостат (фиг. 33) состоит из четырех блоков, на каждом из которых сверху установлен вращающийся магнит (фиг. 34 и *M* на фиг. 35). Угловые отклонения четырех магнитов от средних положений представляют собой четыре главные переменные.

Конструкцию машины мы опишем по частям. Каждый блок создает на своем выходе постоянный ток, пропорциональный отклонению магнита этого блока от среднего положения. Выход управляется следующим образом. Перед каждым магнитом находится сосуд с водой; по концам сосуда расположены электроды, создающие в нем разность потенциалов. К магниту прикреплен провод, погруженный в воду и отводящий на сетку

---

[1] Ради краткости машину назвали «гомеостатом», и это название, по-видимому, приемлемо. Однако производные слова «гомеостатический» и «гомеостатически» в применении к свойствам и поведению машины неудачны, так как приоритет требует, чтобы их применяли только в качестве производных от кэнноновского понятия «гомеостаз».

триода потенциал, величина которого зависит от положения магнита. Источник J создает анодный потенциал 150 *в*, а потенциал в точке H равен 180 *в*; таким образом, через потенциометр E течет постоянный ток определенной величины. Если (что зависит от потенциала сетки) через триод протекает ток точно такой же силы, то на



Фиг. 33. Гомеостат.

На каждом блоке сверху расположены магнит и катушка, показанные на фиг. 34. На передней панели находится три ряда рукояток, при помощи которых осуществляется управление потенциометрами (верхний ряд), переключателями X (средний ряд) и переключателями S (нижний ряд). См. также фиг. 35.

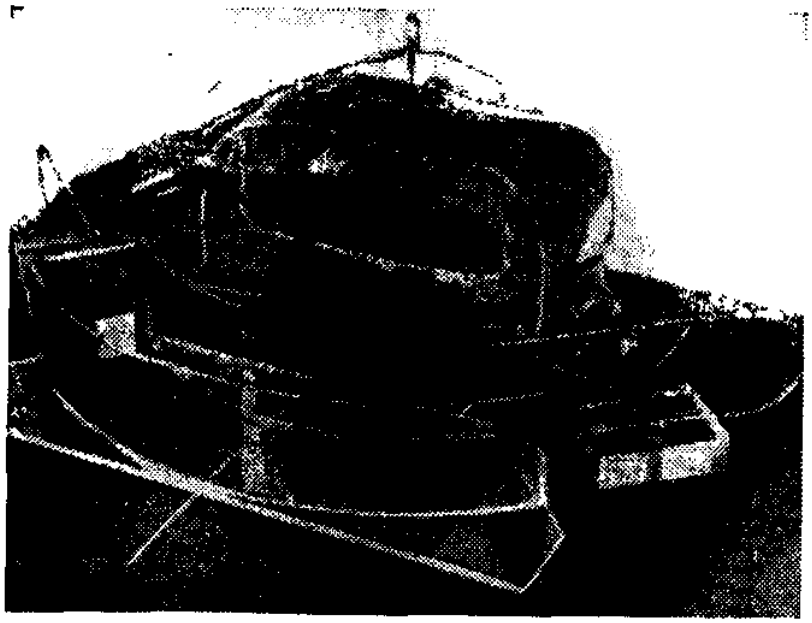
выходе не будет никакого тока. Но если триод пропускает более сильный или более слабый ток, то ток на выходе будет равен разности токов через триод и через потенциометр и будет иметь соответствующее направление. Таким образом, при надлежащей установке потенциометра E ток на выходе приблизительно пропорционален отклонению магнита M от среднего положения [1].

Блоки соединены между собой так, что выходной ток каждого из них подается на три других блока, т. е.

[1] Эрл И. Клетский в Высшей технической школе в Дельфте (Голландия), не изменяя первоначального принципа, сконструировал и построил такую форму машины, в которой магнит, катушки, подвижный электрод и вода заменены схемой моста Кирхгофа и конденсаторами.

каждый блок получает через отдельный вход ток от каждого из трех остальных.

Входные токи действуют на магнит данного блока через обмотки A, B и C, так что вращающий момент магнита приблизительно пропорционален алгебраической сумме токов в обмотках A, B и C. (На магнит действует также обмотка D в качестве собственной обратной связи.) Но прежде чем каждый из входных токов



Фиг. 34. Детали отдельного блока гомеостата: магнит (почти не виден), катушка, ось магнита, подвижный проводник и водяной потенциометр с электродами на обоих концах.

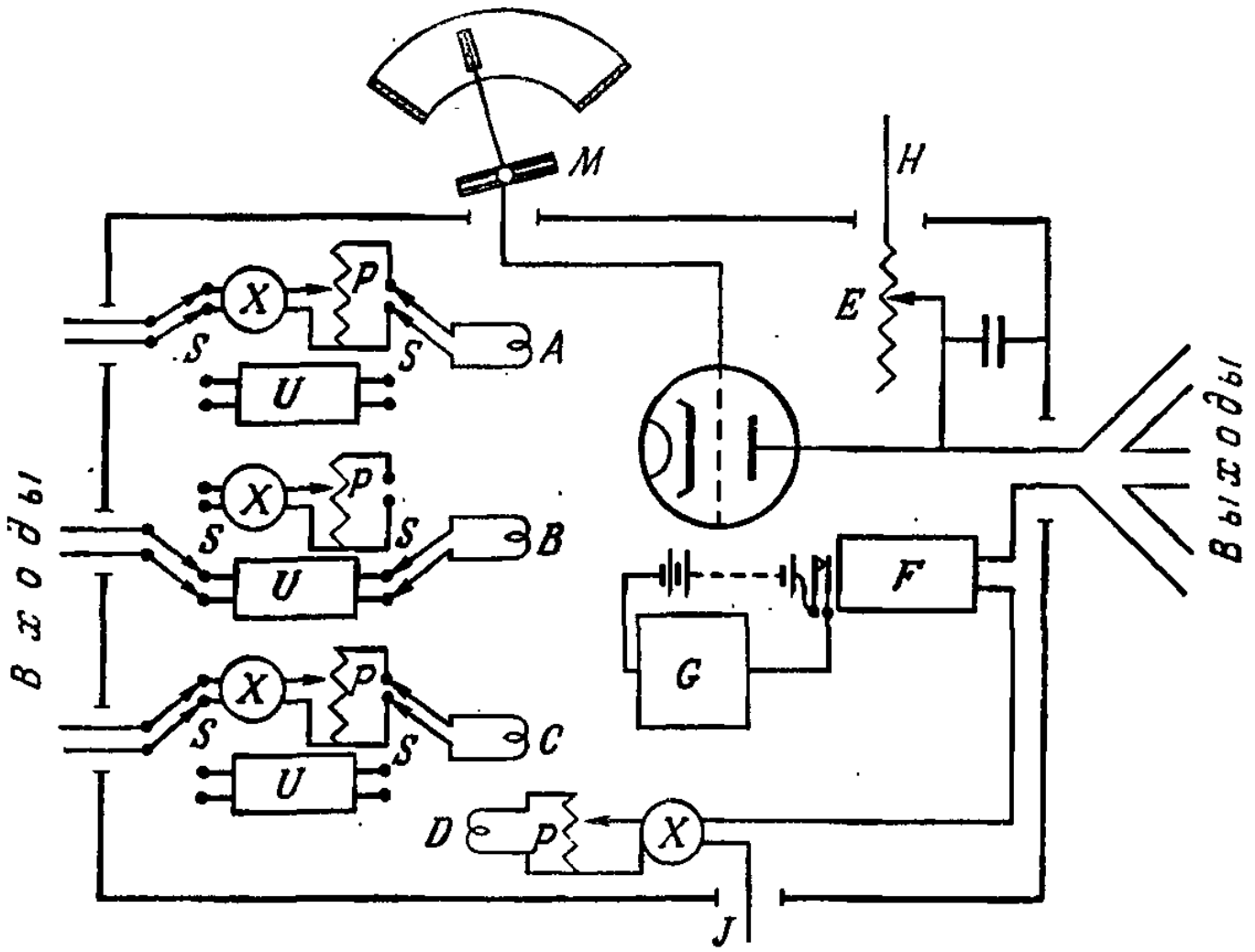
Катушка состоит из четырех обмоток, обозначенных на фиг. 35 буквами A, B, C и D.

достигает соответствующей обмотки, он проходит через переключатель X, определяющий направление его в обмотке, и через потенциометр P, который определяет, какая часть входного тока попадет в катушку.

При включении системы магниты начинают двигаться под действием токов от других блоков, но эти движения ведут к изменению токов, которое в свою очередь изменяет движения, и т. д. Можно показать (§ 19.11), что, поскольку вязкость воды в сосудах достаточно высока, система четырех переменных — положений магнитов — ведет себя приблизительно как

система, определяемая состоянием. Переключатели и потенциометры служат для этой системы параметрами.

Когда этим параметрам задан определенный набор значений, магниты ведут себя вполне определенным образом, так как параметры определяют поле системы и тем самым ее линии поведения. Если это поле стабильно, все четыре магнита приходят в среднее положение,



Фиг. 35. Схема одного блока гомеостата.
Объяснение см. в тексте.

в котором они активно сопротивляются всякой попытке сместить их. В случае смещения возникает *координированная* активность, возвращающая их в среднее положение. Однако другие сочетания параметров могут привести к нестабильности; в этом случае происходит «выброс», и магниты с возрастающей скоростью отходят от своих средних положений, пока не упираются в концы сосудов с водой.

Таким образом, мы показали, что наша система из четырех переменных является динамической системой, определяемой состоянием, и что схема непосредственных воздействий для нее будет выглядеть как фиг. 13,*А*. Поле этой системы зависит от 32 параметров *X* и *P*. Она пока еще не ультрастабильна. Но вместо того, чтобы управлять входными токами путем «ручной» установки параметров, можно направить эти токи с помощью переключателей *S* через аналогичные компоненты, установленные на униселекторе (шаговом переключателе) *U*. Выбор значений компонентов в *U* намеренно сделан случайным: для них были взяты числовые значения из «Таблицы случайных чисел» Фишера и Йейтса. Так как компоненты подмонтированы к шаговым переключателям, значения параметров в каждый данный момент определяются положением этих последних. 25 положений каждого из четырех униселекторов (по одному на каждый блок) обеспечивают 390 625 комбинаций значений параметров.

Реле *F* представляет собой существенную переменную блока. Его контакты замыкаются тогда и только тогда, когда ток на выходе превышает определенную величину. Когда это происходит, в катушки *G* униселектора поступает ток, что ведет к изменению величин параметров. Цепь катушки *G* регулярно прерывается при помощи особого приспособления (не показанного на схеме), позволяющего подавать напряжение на контакты *F* с интервалами от 1 до 10 *сек* (частоту может регулировать оператор). Например, при установке на 3-секундные интервалы униселектор будет каждые 3 *сек* либо изменять величины параметров (если *F* получает ток, сила которого выходит из данных пределов), либо оставлять их прежними (если сила тока остается в этих пределах).

8.3. В том, что описанная машина ультрастабильна, можно убедиться путем исследования соответствия ее определениям ультрастабильности, данным ранее.

Машина имеет четыре главные переменные — положения четырех магнитов (конечно, их может быть

меньше, если используются не все четыре блока). Эти переменные соответствуют как «среде», так и реагирующей части R на фиг. 22 — распределение их между двумя подсистемами произвольно. Реле F соответствуют существенным переменным, а токи, протекающие через F, когда контакты магнитов отклонены от среднего положения более чем на 45°,— физиологическим пределам. Главные переменные изменяются непрерывно и воздействуют друг на друга, образуя первичную обратную связь сложной структуры — типа A на фиг. 13. Поле четырех главных переменных имеет лишь одно состояние равновесия (в центре), которое может быть устойчивым или неустойчивым. Таким образом, система либо стабильна и способна самостоятельно устранять небольшие импульсные отклонения магнитов, либо нестабильна и, будучи выведена из равновесия, прогрессивно «саморасстраивается», пока контакты магнитов не доходят до концов сосудов с водой. Какой она будет, зависит от количественных характеристик первичных обратных связей, которые определяются значениями ступенчатых функций.

Соответствие между ступенчатыми механизмами (§ 7.18) и частями гомеостата можно с равным основанием представлять себе в нескольких различных вариантах. Пожалуй, проще всего отождествить состояние этих механизмов с 12 величинами, определяемыми положением униселекторов (по 3 для каждого из них). Если контакт магнита одного из блоков на достаточное время выйдет из пределов $\pm 45°$, то три ступенчатые функции блока изменят свое значение. Три новых значения не имеют никакой определенной связи с предыдущими значениями или с проблемой, поставленной перед машиной: это просто числа, следующие по порядку в таблице Фишера и Йейтса.

Легко видеть, что и при использовании любого отдельного блока, либо двух или трех блоков (что часто делают ради упрощения) полученная подсистема тоже будет ультрастабильной.

Гомеостат как механизм, способный к адаптации

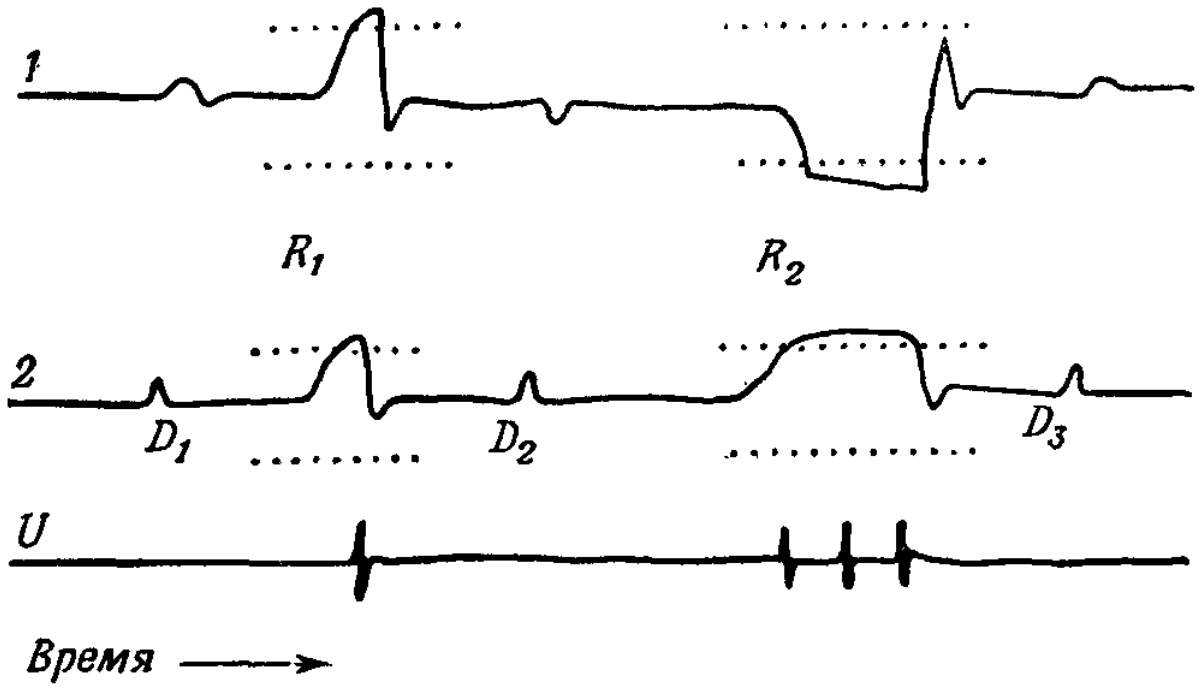
8.4. Одно из замечательных свойств нервной системы состоит в том, что она способна приспосабливаться к изменениям, произведенным путем хирургического вмешательства. Подобные эксперименты, начиная с первой работы Марина и кончая недавними работами Сперри, вызвали большой интерес и немалое удивление.

Более 40 лет назад Марина перерезал у обезьяны места прикрепления внутренней и наружной прямых мышц глаза и прикрепил эти мышцы так, что они оказались перекрещенными и сокращение наружной прямой мышцы поворачивало глаз уже не наружу, а внутрь к средней линии. Когда рана зажила, Марина с удивлением обнаружил, что оба глаза продолжали двигаться согласованно, т. е. бинокулярное зрение сохранилось.

Впоследствии Сперри перерезывал нервы мышц-сгибателей и мышц-разгибателей передней конечности у паукообразной обезьяны и сшивал их перекрестным образом. После регенерации нервов координация движений передних конечностей вначале была резко нарушена, но она постепенно улучшалась, пока не восстановилась способность к более или менее нормальному передвижению. Такие результаты типичны для огромного числа опытов, и нам достаточно двух приведенных примеров. Теперь посмотрим, как будет вести себя после аналогичной операции гомеостат.

На фиг. 36 показано поведение гомеостата, ради простоты составленного только из двух взаимодействующих блоков. Схема непосредственных воздействий имела вид $1 \rightleftarrows 2$; воздействием $1 \to 2$ экспериментатор управлял вручную, а воздействием $2 \to 1$ — через униселектор. Вначале комбинация значений ступенчатых функций обеспечивала стабильность, как видно по реакции на D_1. (Читатель, конечно, должен иметь в виду, что это простое возвращение к исходному состоянию после смещения *служит прототипом* всех сложных видов того процесса, рассмотренных в гл. 5.) В момент R_1

новая установка переключателя, произведенная вручную, сделала систему нестабильной, произошел выброс и переменные вышли из заданных пределов. Униселектор блока 1 изменил свое положение, и, как оказалось, первая же последующая проба привела к стабильному полю. Можно видеть, что если до R_1 отклонение вверх



Фиг. 36. Взаимодействие двух блоков гомеостата (1 и 2).

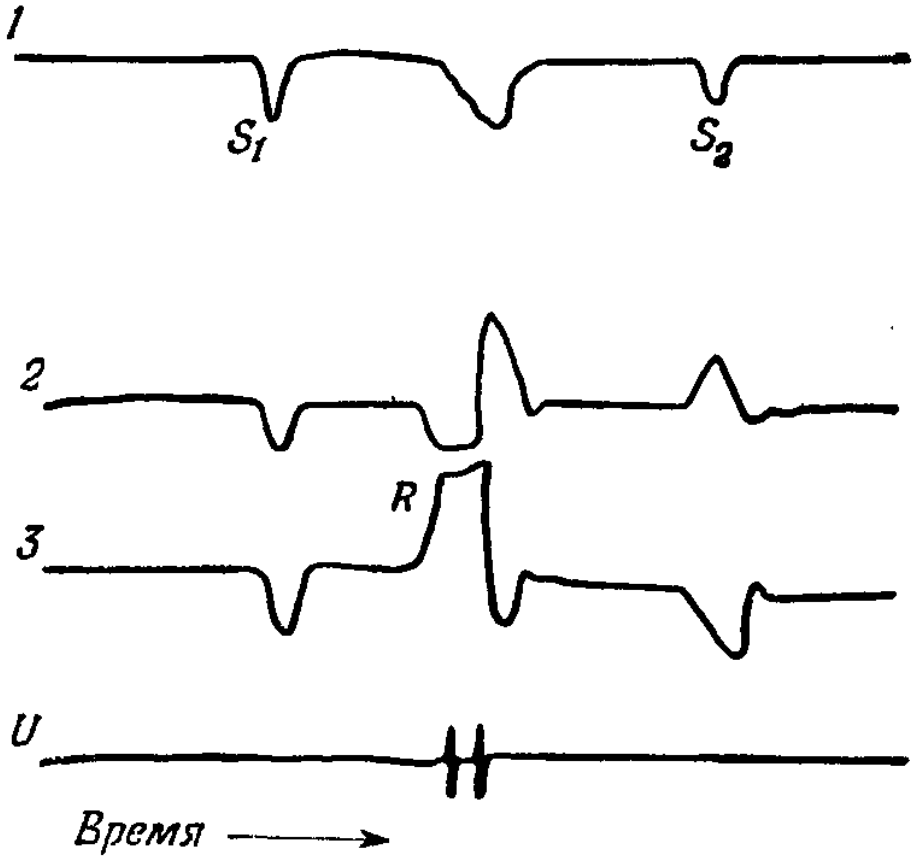
Вертикальные отклонения кривых 1 и 2 отражают боковые движения магнитов в блоках 1 и 2 соответственно. Пики на кривой U появляются в моменты изменения положения шагового переключателя в блоке 1. Пунктирные линии соответствуют критическим состояниям. Отклонения D производил оператор, для того чтобы определить реакцию системы.

(D_1) в блоке 2 приводило к отклонению *вверх* в блоке 1, то после R_1 оно вызывает в блоке 1 отклонение вниз, т. е. униселектор вызвал *инверсию* действия $2 \to 1$. Этой инверсией была *скомпенсирована* инверсия действия $1 \to 2$, вызванная перестановкой переключателя в момент R_1.

После R_2 весь процесс повторился. На этот раз для восстановления стабильности потребовалось три перестановки униселектора. Сравнение результата действия D_3 на блок 1 с результатом действия D_2 показывает, что вновь произошла компенсация.

Если мы хотим установить соответствие между явлениями в нервной системе и в гомеостате, то мы должны (см. § 3.12) обратить внимание на то, что анатомический критерий разделения системы на «животное»

и «среду» — не единственно возможный: возможен и функциональный критерий. Предположим, что обезьяна, для того чтобы достать пищу из ящика, должна потянуть к себе рычаг; если мы перережем сухожилия мышц-сгибателей и мышц-разгибателей руки и прикрепим эти мышцы в перекрестном положении, то для коры головного мозга это изменение не будет существенно отличаться от такой перестройки ящика, после которой



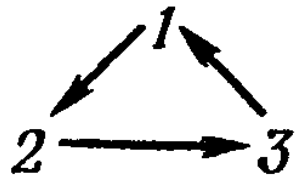
Фиг. 37. Взаимодействие трех блоков.
В момент *R* произошла инверсия действия 2→3.

рычаг нужно будет толкать, а не тянуть к себе. Спинной мозг, периферические нервы, мышцы, кости, рычаг и ящик — все это компоненты «среды» для коры головного мозга. Перекомбинация связей в коре мозга может компенсировать инверсию связи в среде независимо от того, произойдет ли она в спинном мозгу, мышцах или рычаге. Поэтому можно ожидать, что кора мозга будет использовать один и тот же компенсаторный процесс, где бы ни произошла инверсия.

Для того чтобы применить принцип ультрастабильности, мы должны предположить, что такие явления, как «бинокулярное зрение» и «нормальное передвижение

животного», связаны с теми нервными механизмами, благодаря которым отклонения этих функций от нормы приводят к возбуждению, достаточному для того, чтобы вызвать изменения ступенчатого типа в механизмах, управляющих этими функциями. (Вопрос о правдоподобности этой гипотезы будет рассмотрен в § 9.4.) Тогда ультрастабильность автоматически приведет к возникновению поведения, обеспечивающего бинокулярное зрение или нормальное передвижение.

8.5. Более сложный пример показан на фиг. 37. Блоки гомеостата были включены таким образом, что схема непосредственных воздействий имела вид



Связь 3 → 1 была постоянно установлена так, что отклонение в блоке 3 вызывало отклонение противоположного направления в блоке 1. Действие 1 → 2 управлялось униселектором, а действие 2 → 3 — экспериментатором вручную. В начале опыта действия 1 → 2 и 2 → 3 испытывались путем смещения 1 вниз (S_1), производимого экспериментатором; за этим следовало отклонение 2 вниз (т. е. в том же направлении), а за отклонением 2 следовало смещение 3 вниз (в том же направлении). Затем отклонение 3 приводило к смещению 1 вверх — в направлении против исходного смещения, что и обусловливало стабильность.

В момент R экспериментатор произвел инверсию действия 2 → 3, так что теперь отклонение 2 приводило к *противоположному* отклонению 3. Это изменение создавало порочный круг и уничтожало стабильность; однако положение униселектора продолжало изменяться, пока стабильность не была восстановлена. При насильственном смещении 1 вниз (S_2) обнаруживалась вновь обретенная стабильность.

Однако полученная запись заслуживает более внимательного изучения. В момент R действие 2 → 3 было

инверсировано, и реакции блоков 2 и 3 на смещение S_2 демонстрируют эту инверсию: в точке S_1 блоки 1 и 2 отклонялись в одну и ту же сторону, а в точке S_2— в противоположные стороны. Сравнение контролируемого униселектором действия $1 \rightarrow 2$ до и после R тоже показывает, что если вначале отклонение 2 было таким же, как и отклонение 1, то впоследствии оно стало противоположным. Таким образом, инверсия связи $2 \rightarrow 3$, произведенная экспериментатором, вызвала инверсию связи $1 \rightarrow 2$, контролируемой униселектором. Вторая инверсия компенсировала первую.

Нервная система дает много примеров такой последовательности событий: сначала вырабатывается реакция, затем экспериментатор производит изменение во внешней среде, и, наконец, в нервной системе происходит перестройка, компенсирующая это изменение. Таким образом, гомеостат может обладать, в элементарной форме, способностью к самоперестройке.

8.6. Теперь мы можем оценить, насколько отличается ультрастабильная система от простой стабильной системы, когда условия позволяют ясно проявиться этому отличию.

Покажем это на примере. Автопилот представляет собой прибор, который, помимо прочего, поддерживает самолет в горизонтальном положении. Поэтому он должен быть таким образом связан с элеронами, чтобы в случае правого крена элероны под действием его выходных величин заставляли самолет крениться влево. При надлежащем соединении частей вся система стабильна и способна к самокоррекции: самолет может безопасно пересекать турбулентные потоки воздуха, ибо, несмотря на частое возникновение крена, он всегда будет выравниваться. Гомеостат при таком соединении действовал бы сходным образом. (Он не вполне приспособлен для этой цели, но в принципе, будучи снабжен гироскопом, он мог бы выправлять крен.)

Пока мы не обнаружили различия между этими двумя приборами. Но сравним их действие при обратном соединении с элеронами; теперь при возникновении

небольшого крена автопилот будет способствовать *увеличению* крена и будет упорно действовать таким неправильным образом до самого конца. Гомеостат же будет действовать так лишь до тех пор, пока возрастающее отклонение не заставит ступенчатые функции изменить свое значение. При первом же появлении подходящего нового значения гомеостат начнет действовать как стабилизатор, вместо того чтобы усиливать возникший крен, и вернет самолет в горизонтальное положение; теперь он будет обычным образом автоматически исправлять отклонения.

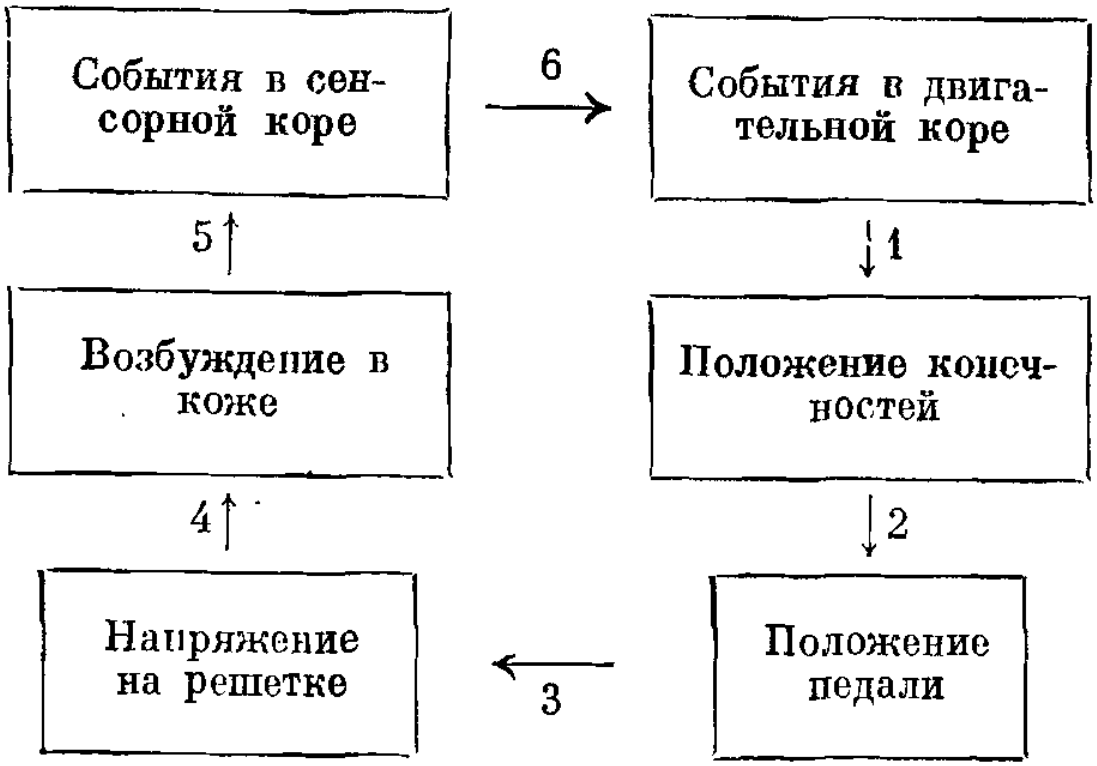
Таким образом, название «ультрастабильная система» не лишено оснований; ибо если главные переменные такой системы связаны между собой так, что их поле нестабильно, она будет изменять это поле до тех пор, пока оно не сделается стабильным. Следовательно, здесь мы имеем стабильность более высокого порядка, чем у системы с одним полем.

8.7. Опыты Марина и Сперри служат отличным вводным примером, так как в принципе они очень просты. Иногда в простом эксперименте с адаптацией удается установить его существенные особенности лишь после некоторого размышления. Например, Маурер помещал крыс в ящик, полом которого служила металлическая решетка. К ней можно было подвести электрическое напряжение, так что крыса, ступая на решетку, получала удары. Внутри ящика находилась педаль, при опускании которой удары тотчас прекращались.

Когда крысу помещали в ящик и включали ток, животное обычно проявляло нецеленаправленную активность — прыгало, бегало, пищало, кусало решетку и беспорядочно наносило удары лапами вокруг себя. Раньше или позже крыса случайно нажимала на педаль и электрические удары прекращались. После 10-й пробы при включении тока крыса обычно направлялась прямо к педали и нажимала на нее. Таковы вкратце наблюдаемые факты.

Рассмотрим внутренние связи этой системы. Мы можем достаточно точно охарактеризовать происходящие

в ней явления с помощью шести переменных, или комплексов переменных, показанных в нижеследующей схеме непосредственных воздействий, которую можно построить, рассматривая действие частей друг на друга в реальной системе.



Например, возбуждение в двигательной коре, несомненно, управляет движениями крысы, но не оказывает никакого прямого действия ни на одну из остальных пяти групп переменных; поэтому мы можем поставить стрелку 1, зная, что от того же прямоугольника никаких других стрелок не отходит. (Эта единственная стрелка, разумеется, обозначает сложный канал.) Таким же путем можно найти положение остальных стрелок схемы. Некоторые из них, например 2 и 4, соответствуют связи, не осуществляющей положительное физическое воздействие непрерывно; однако, согласно § 2.3, мы считаем такие связи постоянными, но действующими иногда с нулевой интенсивностью.

Закончив построение схемы, мы замечаем, что она образует замкнутую функциональную цепь. Система является полной и изолированной, и поэтому ее можно считать системой, определяемой состоянием. Для того чтобы применить наш тезис, мы принимаем, что часть схемы, соответствующая мозгу (прямоугольники, соеди-

ненные стрелкой 6), содержит ступенчатые механизмы, которые переходят через критические состояния, когда головной мозг получает стимулы, интенсивность которых выходит за физиологические границы.

Мы считаем систему ультрастабильной и предсказываем, каким должно быть ее поведение. В ее начальном состоянии, согласно гипотезе, напряжение на решетке велико. Вследствие этого сильным будет и возбуждение в коже и в головном мозгу. Вначале комплексы импульсов, посылаемых к мышцам, не приводят к тому движению педали, которое снизило бы напряжение на решетке. Сильное возбуждение в мозгу заставит какие-то ступенчатые функции изменить значение, тем самым вызывая различные комплексы движений тела. Ступенчатые механизмы непосредственно действуют только на этапе 6, но вызванные ими изменения будут (§ 12.9) влиять на поле всех шести групп главных переменных. Изменения поля будут происходить все время, пока продолжается сильное возбуждение в мозгу. Они прекратятся тогда и только тогда, когда связи на этапе 6 преобразуют возбуждение кожных рецепторов в такие движения тела, которые через посредство педали уменьшат это возбуждение кожных рецепторов — только такие связи могут прекратить дальнейшее наступление критических состояний. Иными словами, система будет изменяться до тех пор, пока не образуется стабильное поле. Стабильность проявится в том, что увеличение напряжения на решетке будет вести к такой цепи изменений в коже, головном мозгу, мышцах и педали, которые в конечном результате *противодействуют* увеличению напряжения. Кроме того, стабильность обладает тем свойством, что благодаря ей существенные переменные удерживаются в физиологических пределах: крыса охраняется от поражения электрическим током, а ее нервная система — от полного истощения.

Можно заметить, что хотя действие 3 не имеет прямой связи (будь то видимое соединение в реальном аппарате или функциональная связь на схеме непосредственных воздействий) с местом изменений, происходя-

щих на этапе 6, последний тем не менее приобретает адаптацию к характеру действия на этапе 3. (Этот вопрос был рассмотрен в § 5.13.)

Таким образом, этот пример показывает, что если бы крыса и окружающая ее среда составляли ультрастабильную систему и действовали чисто автоматически, они прошли бы через такой же ряд изменений, какой наблюдал Маурер.

Дрессировка

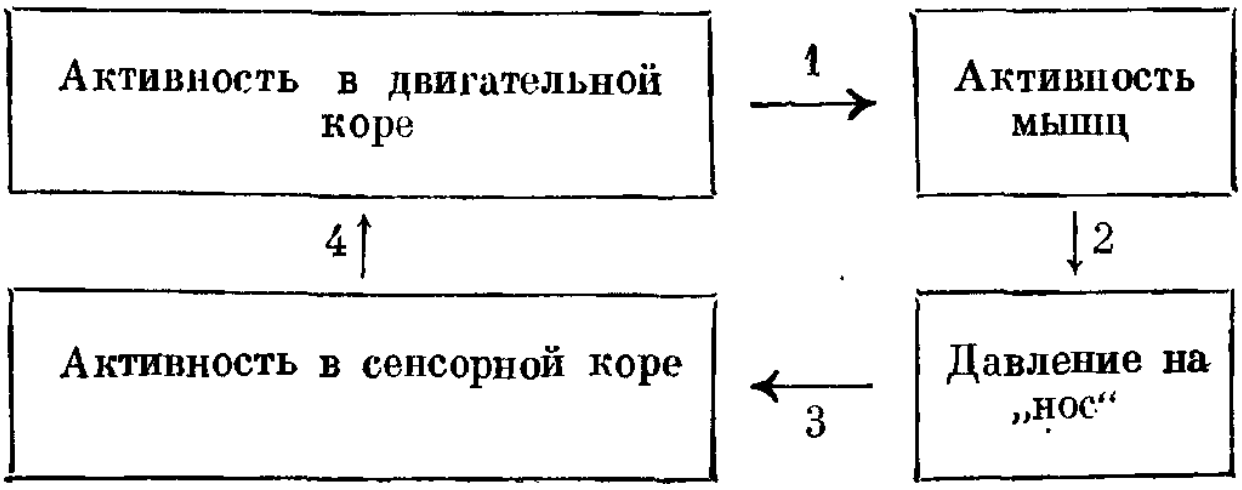
8.8. Теперь мы рассмотрим процесс «дрессировки» в его отношении к ультрастабильности.

Всякая дрессировка связана с применением «наказания» или «вознаграждения», и мы должны перевести эти понятия на наш язык. Понятие «наказания» несложно, так как оно означает, что те или иные органы чувств или нервные окончания подверглись раздражению, достаточно сильному для того, чтобы вызвать изменение ступенчатых функций в нервной системе (§ 7.19 и 9.7). Понятие «вознаграждения» сложнее. Оно обычно связано с появлением какого-нибудь вещества (например, пищи) или созданием каких-нибудь условий (например, освобождения животного), отсутствие которых действовало бы как «наказание». Главная трудность состоит в том, что, судя по имеющимся данным, нервная система, особенно у млекопитающих, по-видимому, содержит сложные специализированные механизмы, придающие животным свойства, которые нельзя вывести из одних лишь основных принципов. Установлено, например, что собаки с фистулой пищевода, несколько часов не получавшие воды, обычно выпивают — если дать им пить — приблизительно столько воды, сколько нужно для восполнения создавшегося дефицита, а затем перестают пить; они больше не пьют, хотя ни в желудок, ни в организм не поступило ни капли воды. Свойства такого рода механизмов еще не вполне выяснены, так что при дрессировке с применением наград

используются механизмы с неизвестными свойствами. Здесь мы обойдем эти сложности. Мы предположим, что дрессировка основана на наказании (нанесение болевого раздражения), т. е. на каком-то изменении, угрожающем вывести существенные переменные из их нормальных границ; мы предположим также, что дрессировка при помощи наград основана на каком-то сходном принципе.

Следует заметить, что в опытах с дрессировкой экспериментатор часто играет двойственную роль. Во-первых, он планирует эксперимент и решает, какие правила должны соблюдаться на его протяжении. Затем, когда правила установлены, он участвует в эксперименте и подчиняется этим правилам. Первая роль нас не интересует. Что касается второй роли, то важно отметить, что экспериментатор находится теперь *внутри* функционального механизма эксперимента. Это легче понять, если его место занимает неквалифицированный, но послушный ассистент, слепо выполняющий инструкции, или, еще лучше,— аппарат, автоматически совершающий предписанные действия.

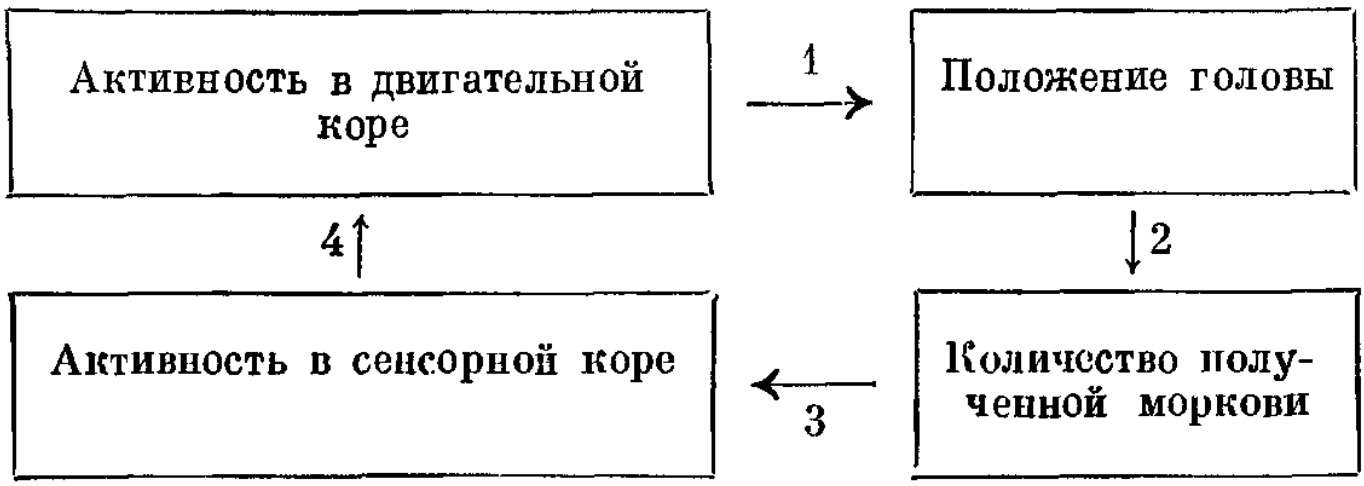
Когда весь процесс дрессировки совершается автоматически, легко показать наличие обратной связи, построив схему непосредственных воздействий. Например, в одном случае щуку, находящуюся в аквариуме, отделяли от нескольких небольших рыб плоским стеклом: всякий раз, когда щука бросалась на этих рыб, она ударялась о стекло. Здесь можно ясно различить следующие прямые воздействия:



Стрелкой 1 изображено управление, осуществляемое через спинной мозг и двигательные нервы. Действие 2 не осуществляется непрерывно, но оно не менее ясно: опыт поставлен так, что определенная активность ведет к сильному давлению на «нос» щуки, другие же виды активности — к нулевому давлению. Действия 3 и 4 представляют собой просто нейрофизиологические последствия того или иного давления на «нос».

Хотя схема дает некоторую свободу выбора переменных, соединяемых стрелками, ясно, что система, рассматриваемая в целом, содержит обратную связь.

В других опытах с дрессировкой регулярность действия 2 (которая в предыдущем случае зависела от постоянных физических свойств стекла) может обеспечиваться ассистентом, все время выполняющим правила, установленные экспериментатором. Например, Гриндли содержал морскую свинку в звуконепроницаемой камере, в которой время от времени звучал зуммер. В том и только в том случае, если свинка поворачивала голову вправо, выдвигалась кормушка с куском моркови; после того как свинка отгрызала немного моркови, пища удалялась и процесс повторялся сначала. Можно показать наличие в этой системе обратной связи, так как схема непосредственных воздействий имела следующий вид:

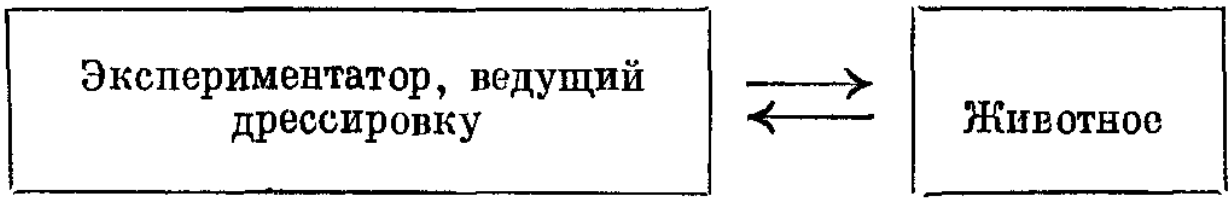


Зуммер, который ради простоты здесь опущен, играет роль параметра и служит лишь для функциональной реализации этой динамической системы: связь 2 существует только во время его звучания.

Основная динамическая структура эксперимента этого типа становится яснее, если сравнить его с элементарной выработкой условных рефлексов по Павлову. Как Гриндли, так и Павлов использовали в своих опытах последовательность «зуммер — реакция животного — пища». В опыте Гриндли величина переменной «пища» *зависела от реакции животного*: при повороте головы влево «пищей» было «отсутствие моркови», тогда как при повороте вправо имела место «дача моркови». В опытах же Павлова характер каждого раздражителя был определен еще *до начала эксперимента*. Таким образом, павловский эксперимент не допускает никакого действия переменной «поведение животного» на переменную «количество полученной пищи»; здесь нет замкнутой функциональной цепи и нет обратной связи.

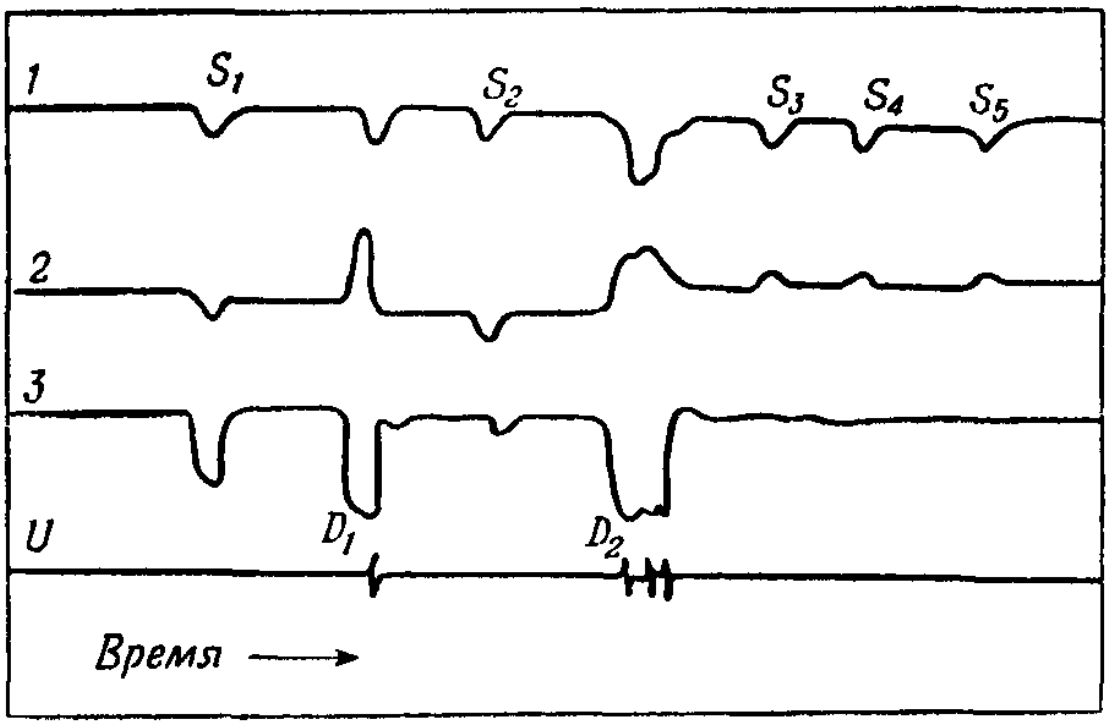
Можно подумать, что это различие (соответствующее тому, которое проводили Хилгард и Марквис между «выработкой условной реакции» и «инструментальным научением») является чисто словесным. Но это не так, ибо проведенное выше сравнение показывает, что различие между опытами Гриндли и Павлова можно установить объективно, исследовав структуру каждого из них.

Ситуация «дрессировки» с необходимостью предполагает, что экспериментатор или какое-нибудь аналогично действующее приспособление составляет неотъемлемую часть системы, обладающей обратной связью:



Предположим теперь, что система ультрастабильна, и проследим ее поведение, исходя из этого предположения. Мы принимаем, конечно, что все ступенчатые механизмы находятся в животном: во-первых, экспериментатора можно в некоторых опытах заменить таким

простым приспособлением, как стекло в примере со щукой, а во-вторых, правила дрессировки должны быть установлены заранее (например, если мы решаем наказывать комнатную собаку всякий раз, когда она

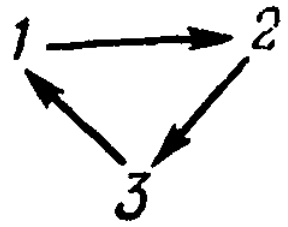


Фиг. 38. Взаимодействие трех блоков.

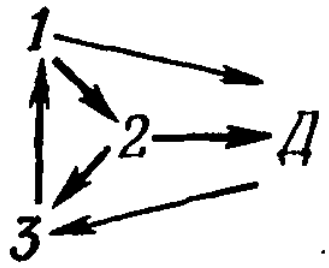
Отклонения кривой *1* вниз (*S*) вызывает оператор. Если блок 2 отвечает отклонением вниз, оператор переводит блок 3 в область критических состояний.

вскакивает на кресло) и поэтому неизменны на протяжении всего процесса. Предположим теперь, что прыжок на кресло всегда приводит к сильному раздражению рецепторов собаки. Поскольку система ультрастабильна, при данных значениях ступенчатых функций (которые приводят к вскакиванию на кресло) будет происходить раздражение, которое легко может заставить эти величины измениться. Но после появления такого комплекса ступенчатых функций, при котором собака остается на полу, чрезмерного раздражения не будет и величины этих функций не изменятся. (Прекращение наказаний при правильных действиях — не менее важный фактор дрессировки, чем наказание после неправильных действий.)

8.9. Этот процесс можно продемонстрировать на гомеостате. Примером служит фиг. 38. Были соединены три блока по схеме



и к этой системе присоединен «дрессировщик» (это был я сам), который действовал по следующему правилу: если гомеостат не отвечал на принудительное отклонение в блоке 1 *противоположным* отклонением в блоке 2, то «дрессировщик» должен был отвести магнит в блоке 3 в крайнее положение. Поэтому схема непосредственных воздействий фактически была такой:



Как можно заметить, часть обратных связей системы проходит через дрессировщика (*Д*).

Вначале (S_1) за отклонением в блоке 1 последовало отклонение в блоке 2 в ту же сторону. Это была «запрещенная» реакция. Поэтому «дрессировщик» отвел магнит в блоке 3 в крайнее положение (D_1). Ступенчатые функции изменили величину. После этого (S_2) действие гомеостата испытали еще раз, и он снова ответил запрещенной реакцией; тогда (D_2) магнит блока 3 снова отвели в крайнее положение. Снова испытали действие гомеостата (S_3), и он дал желаемый ответ; поэтому дальнейших насильственных отклонений в блоке 3 не производили. При испытаниях S_4 и S_5 гомеостат продолжал реагировать «правильно».

Начиная с момента S_1, поведение «дрессировщика» (*Д*) детерминировано, так что система, состоящая из трех

блоков, «дрессировщика» и униселекторов, является системой, определяемой состоянием.

Нужно отметить еще одно свойство всей системы. При сочетании одинаково направленных отклонений в блоках 1 и 2 «дрессировщик» обязан, согласно правилам эксперимента, насильственно вывести блок 3 за пределы области, ограниченной критическими состояниями. Относительно любой неодушевленной системы с таким поведением мы просто сказали бы, что ее линия поведения, начиная с того состояния, при котором начались движения 1 и 2, нестабильна. Таким образом, слова «дрессировщик наказал животное» в переводе с языка психологии на наш язык означают, что комбинация значений параметров системы такова, что система становится нестабильной.

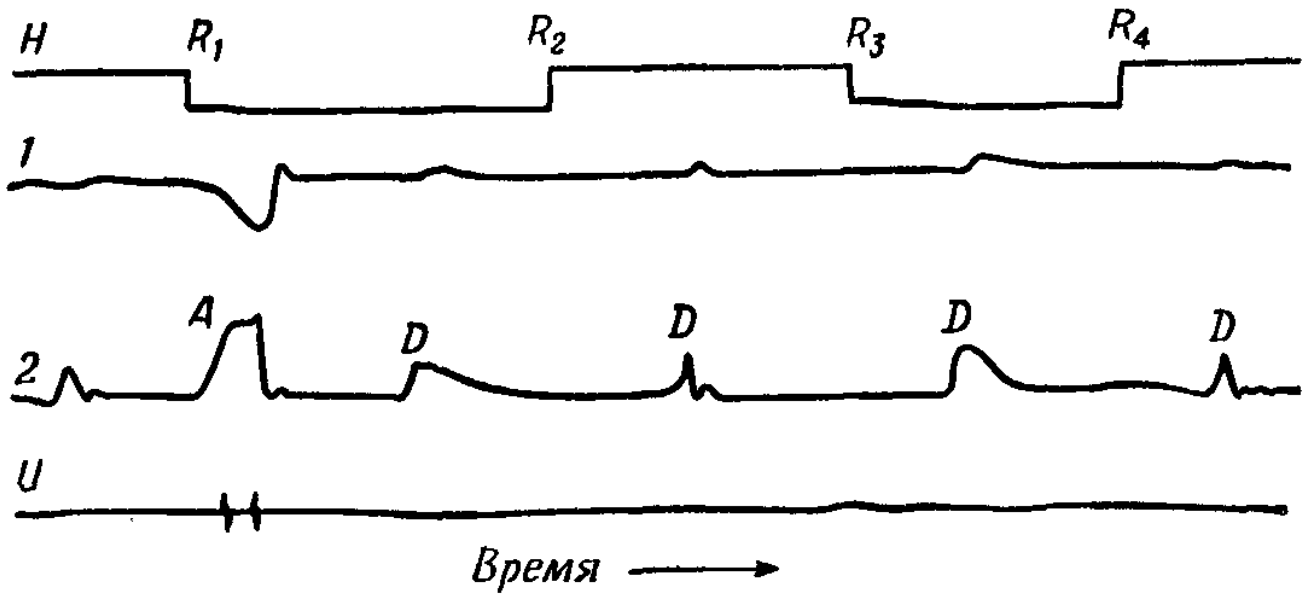
В целом мы можем отождествить поведение животного при дрессировке с поведением ультрастабильной системы, адаптирующейся к другой системе с постоянными характеристиками.

8.10. Как будет вести себя ультрастабильная система, если ей придется поочередно адаптироваться к двум резко различным видам окружающей среды? Такая ситуация весьма обычна: ныряющая птица должна приспосабливаться к условиям, существующим на суше и под водой; птицы Британских островов должны адаптироваться к густой листве летом и к голым ветвям зимой, а котенок — к мыши, пытающейся скрыться от него в узком отверстии, и к птице, которая спасается от него, взлетая в воздух.

Такие случаи эквивалентны (согласно §§ 6.3 и 7.20) наличию одной среды, на которую влияет параметр, способный принимать два значения. Каждое из них, если только оно держится достаточно долго для того, чтобы могли проявиться характерные признаки адаптивного поведения, дает одну из форм среды; обе формы одной среды можно, если угодно, рассматривать как две среды. Таким образом, поставленный нами вопрос можно исследовать, наблюдая адаптацию гомеостата в присутствии параметра, поочередно принимающего

два значения, каждое из которых должно сохраняться достаточно долго, чтобы изменение его не прерывало процесс проб и ошибок.

Создадим такие условия, чтобы управление гомеостатом частично производилось униселекторами, частично — вручную, экспериментатором. Приведем гомеостат в действие так, чтобы он работал как ультрастабильная система. Выберем один из переключателей и будем время от времени изменять его положение на обратное. Это переключение будет служить для системы эквивалентом двух чередующихся условий среды. Теперь мы можем предсказать, что *система будет избирательной в отношении полей, дающих адаптацию к обоим*



Фиг. 39. Запись поведения гомеостата при чередовании двух положений переключателя H (моменты переключения — R_1, R_2 и т. д.).

Первый набор величин на униселекторе, обеспечивший стабильность при обоих положениях переключателя H, был вафиксирован.

видам среды. В самом деле, какое поле может закрепиться окончательно? Поле, стабильное лишь при одном значении параметра, будет утрачено после его очередного изменения; но поле, стабильное при обоих значениях, сохранится. Фиг. 39 иллюстрирует этот процесс. В моменты R_1, R_2, R_3 и R_4 положение переключателя H, управляемого вручную, изменялось. Сначала изменение параметра привело к изменению поля (A). Но при втором положении униселектора случайно создалось

поле, стабильное при обоих значениях H. Поэтому в дальнейшем изменения H не вызывали больше изменений в ступенчатых механизмах. Реакции на отклонения D, производимые экспериментатором, показывают, что система стабильна при обоих значениях H. Небольшое, но ясно видимое различие поведения после D при разных значениях H говорит о том, что два поля различны.

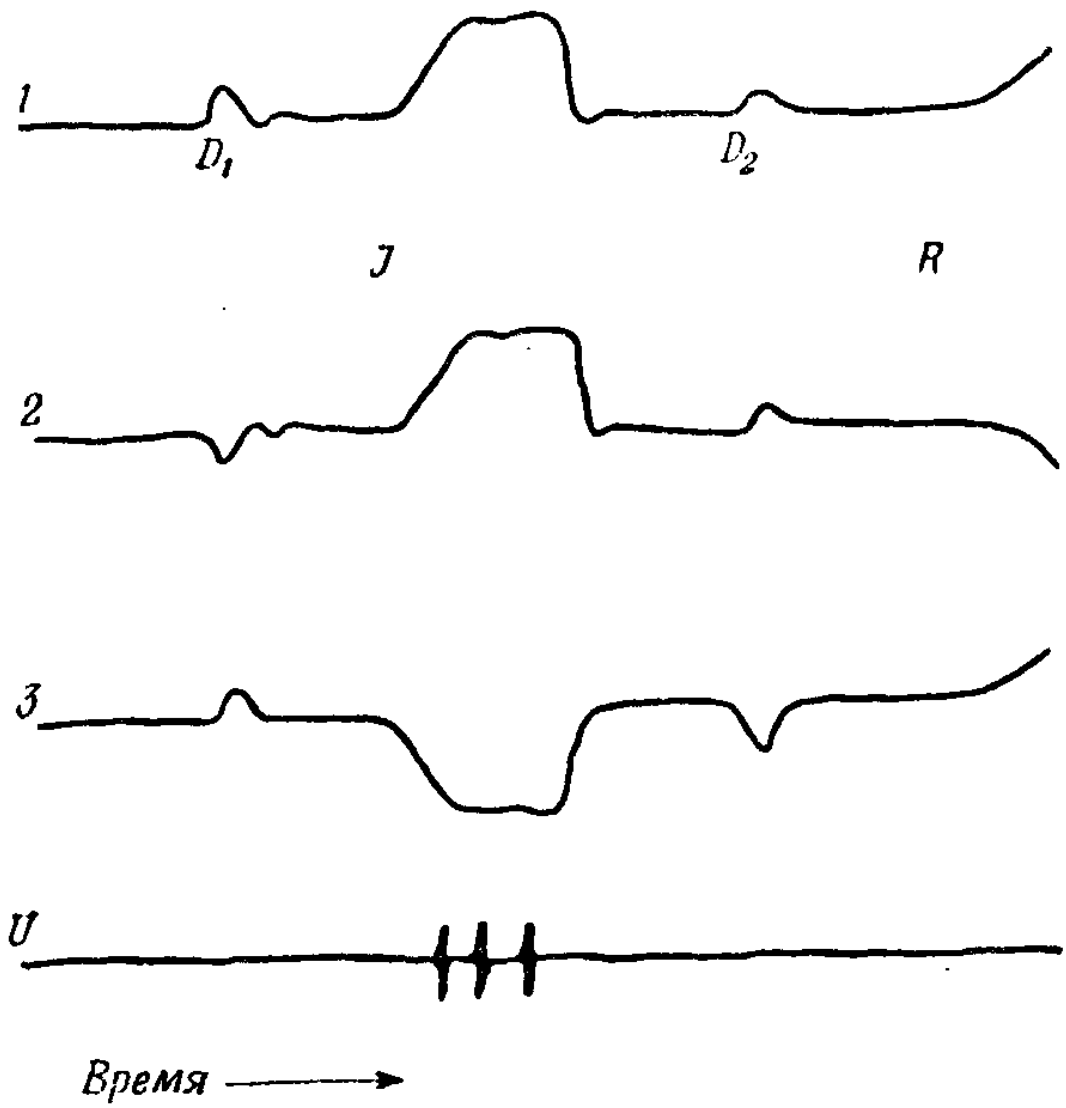
Таким образом, ультрастабильная система избирательно закрепляет те значения ступенчатых функций, которые обеспечивают стабильность при обоих значениях переменного параметра.

8.11. Что произойдет, если ультрастабильную систему поместить в необычную среду? Прежде чем ответить на этот вопрос, мы должны ясно определить, что значит «необычная» среда.

В § 6.2 было показано, что на всякую динамическую систему влияет бесконечное число параметров, многие из которых «сами собой разумеются», так как они всегда имеют хорошо известную, «очевидную» величину. Например, рассматривая механическую систему, мы подразумеваем (если специально не указано обратное), что тела несут нулевой электрический заряд; в физиологических экспериментах подразумевается (если нет особых указаний), что ткани не содержат необычных веществ, в биологических экспериментах — что животное здорово. Все эти параметры, однако, эффективны в том смысле, что если бы величины их не были обычными, то линия поведения переменных была бы иной. Ясно, что поле системы, определяемой состоянием, зависит не только от параметров, установленных индивидуально и с определенным намерением, но и от всего множества параметров, фиксированных случайным образом.

Но ведь ультрастабильная система в конце концов создает себе поле, стабильное при *всех* значениях ее параметров (и ясно, что так и должно быть, так как здесь безразлично, имеют ли параметры «обычные» значения). Поэтому в ультрастабильной системе всегда

будет создаваться такая комбинация значений ступенчатых функций, которая связана с данной комбинацией значений параметров таким образом, что *при этих значениях параметров* система будет стабильной. Если значения параметров необычны, ступенчатые функции тоже в конце концов придут к соответственно необычным, «компенсирующим» значениям. Случайному наблюдателю это приспособление ступенчатых механизмов к величине параметров может показаться



Фиг. 40. Взаимодействие трех блоков.

В момент J магниты блоков 1 и 2 были сцеплены так, что они могли двигаться только совместно. После этого были найдены новые значения ступенчатых функций, обеспечившие стабильность. Эти значения обеспечивают стабильность только при сцеплении, так как после его снятия система становится нестабильной.

неожиданным; мы, однако, можем видеть, что оно неизбежно.

Это можно продемонстрировать на гомеостате. После того как машина была построена, в ее конструкцию

вводили некоторые «необычные» усложнения («необычные» в том смысле, что они не предусматривались до постройки машины) и затем испытывали ее способность находить стабильное поле при тех или иных определенных усложнениях. В одном из таких опытов соединяли два передних магнита легкой стеклянной нитью, так что они могли двигаться только совместно. На фиг. 40 приведена типичная запись поведения такой системы. Были включены три блока, и вначале система была стабильной, как показывает реакция на смещение магнита 1, произведенное оператором (D_1). Затем (в момент J) магниты 1 и 2 сцепляли между собой так, что они могли двигаться только вместе. В данном случае в результате такого ограничения система стала нестабильной. Однако нестабильность вызвала изменения ступенчатых функций, и было найдено новое конечное поле. Оно, разумеется, было стабильным, как показывает реакция на смещение, произведенное оператором (D_2). Но следует заметить, что новая комбинация значений ступенчатых функций была специально приспособлена к созданному сцеплению (как бы «учитывала» его) и даже использовала его для поддержания стабильности; ибо когда (в момент R) оператор осторожно снял стеклянную нить, система стала нестабильной.

Конечно, есть другие необычные проблемы, для решения которых «репертуар» гомеостата недостаточен; такая проблема создалась бы, если бы мы поместили рядом сильный магнит, притягивающий магниты гомеостата в свою сторону, или закоротили реле F (см. фиг. 35). В подобных случаях гомеостат, как и любая ультрастабильная система, не имел бы состояний равновесия и оказался бы поэтому неспособным к адаптации,— так же как и живой организм, встретившийся с проблемой, для решения которой весь его «репертуар» оказывается недостаточным.

О некоторых мнимых дефектах

8.12. Очевидно, что принцип ультрастабильности в той форме, в какой его демонстрирует гомеостат, далеко не воспроизводит всего огромного богатства форм адаптации, вырабатывающихся у высших животных. Некоторые недостатки модели мы рассмотрим позже. Ультрастабильной системе свойствен, однако, ряд «дефектов», которые, как показывает более тщательное исследование, в действительности подкрепляют тезис о том, что живой мозг адаптируется на основе ультрастабильности. Мы рассмотрим их в последующих параграфах.

8.13. Если между существенными переменными и ступенчатыми механизмами нет соотношения, описанного в § 7.5, т. е. если критические поверхности ультрастабильной системы не находятся в надлежащих отношениях к пределам существенных переменных, то может случиться, что система будет преследовать неподходящую цель или не сможет предпринять корректирующее действие, когда существенные переменные окажутся в опасной близости к своим пределам.

Хотя мы пока еще мало что можем сказать о критических состояниях у животных, мы можем наблюдать у них неудачи в адаптации, вполне возможно, обусловленные дефектом этого типа. Например, животные обычно обнаруживают защитную реакцию по отношению к таким ядам, как стрихнин (он очень горек, сильно раздражает вкусовые рецепторы, и животное выплевывает его), но, что очень характерно, беззащитны в отношении яда, лишенного вкуса и запаха — именно потому, что он не вызывает чрезмерного раздражения нервных окончаний и никак не нарушает обычные процессы жевания и глотания.

Еще более ярким примером того, насколько беззащитен живой организм, если боль не оказывает своего обычного влияния на поведение, служат дети, страдающие врожденным отсутствием нормальных защитных рефлексов. Такой случай описали Бойд и Най:

«Девочка 7 лет, казавшаяся здоровой и нормальной

во всех других отношениях, была совершенно нечувствительна к боли. Еще в первый год ее жизни родители обратили внимание, что она не плакала при ушибах. В возрасте 1 года заметили, что у нее искривлена рука; рентгеноскопия показала смещение костей после недавнего перелома. Ребенок перед этим ни на что не жаловался и во время операции не проявил никаких признаков боли при вправлении отломков без анестезии. Спустя три месяца такое же повреждение произошло в правом локте. На морском побережье девочка ползала по скалам до тех пор, пока не ободрала кожу на коленях и кистях рук. Дома ее мать несколько раз чувствовала запах паленого мяса и обнаруживала, что ребенок, ничего не замечая, прижимается к горячей печке».

Это показывает, что если несовершенная ультрастабильная система при известных условиях беззащитна, то так же, по-видимому, может обстоять дело с дефективно сформированным живым организмом.

8.14. Даже если ультрастабильная система построена надлежащим образом — если критические состояния наступают раньше, чем существенные переменные достигают своих пределов,— она обычно не может адаптироваться к среде, поведение которой характеризуется внезапными резкими изменениями. В предыдущих примерах успешной адаптации гомеостата изменения «среды» всегда были непрерывными. Но предположим, что гомеостат управлял бы реле, которое обычно не изменяет своего положения, но в случае прохождения гомеостата через какое-то произвольно выбранное состояние освобождает сильную пружину, отводящую магниты от их «оптимального» среднего положения; гомеостат, если бы он вдруг приблизился к этому особому состоянию, не смог бы ничего предпринять, чтобы избежать его, и совершенно случайно вызвал бы «летальное» действие. Таким образом, метод адаптации гомеостата, по существу, бесполезен, когда его среда содержит такого рода «летальные» разрывы непрерывности.

Однако и живой организм нередко терпит неудачу, встречаясь со средой такого типа. Щуке, натыкавшейся

на стекло при охоте за мелкой рыбой, вначале не удавалось избегать этого именно из-за внезапности перехода из состояния, в котором она не видела прозрачного стекла, в состояние, в котором она уже ощущала удар по «носу». Эта брешь в защитных приспособлениях живого организма, в сущности, давно известна и часто используется охотниками. Когда кошка подкрадывается к добыче, ее движения рассчитаны на то, чтобы как можно дольше сохранить для добычи видимость мирного ландшафта, а затем с максимальной внезапностью создать смертельную угрозу. В этом процессе важна именно внезапность. На той же внезапности основано действие любой эффективной ловушки, а также дозировка яда при уничтожении паразитов и вредителей (первая же доза должна быть смертельной).

Итак, если ультрастабильной системе обычно не удается адаптироваться к среде с внезапными разрывами непрерывности, то не удается это и живому организму.

8.15. Еще одна слабость метода адаптации ультрастабильной системы состоит в том, что успех зависит от надлежащего интервала между последовательными пробами. Так, система, представленная на фиг. 32, должна продолжать пробу *IV* достаточно долго для того, чтобы репрезентативная точка удалилась от области критических состояний. Обе крайности могут быть гибельными: при чересчур поспешном переходе от одной пробы к другой может не хватить времени для выявления «успеха», а при слишком длительном испытании неверного метода может успеть произойти серьезное повреждение. Оптимальная продолжительность пробы, очевидно, соответствует времени, необходимому для того, чтобы информация от ступенчатых механизмов, побуждающих систему к данной пробе, дошла через среду до существенных переменных, сигнализирующих о результате. Если определенная продолжительность пробы нужна для ультрастабильной системы, то нужна она и для живого организма: вряд ли можно сомневаться в том, что во многих случаях живые организмы не достигли успеха потому, что они либо слиш-

ком скоро прекращали пробу, либо слишком долго испытывали метод, в действительности бесполезный. (Этого вопроса мы еще раз коснемся в § 17.10.)

Итак, одна и та же трудность стоит как перед ультрастабильной системой, так и перед живым организмом.

8.16. Если мы расположим различные формы среды в порядке их «трудности» для ультрастабильной системы, то на «легком» конце ряда окажутся сре́ды, состоящие из немногих переменных, независимых друг от друга, а на «трудном» конце — сре́ды, содержащие много переменных, объединенных многочисленными связями в сложное целое. (Этот вопрос мы будем подробнее рассматривать в гл. 11 и далее.)

Живой организм тоже мог бы классифицировать сре́ды, по существу, таким же образом. Это показывает не только повседневный опыт, но и построение и применение «тестов умственного развития»: оно во множестве вариантов показало, что легкой является та проблема, компоненты которой малочисленны и независимы, а трудной — та, в которой имеется много компонентов, образующих сложное целое. Таким образом, при встрече со сре́дами различной «трудности» ультрастабильная система и живой организм чаще всего будут терпеть фиаско в одних и тех же случаях.

8.17. В предыдущих параграфах мы несколькими способами продемонстрировали, что различные «недостатки» ультрастабильной системы оказываются при ближайшем рассмотрении свойственными не только ультрастабильной системе, но и живому мозгу. Ясно, что мы не должны поспешно отвергать какую-либо модель из-за отсутствия у нее того или иного свойства, пока не будем вполне уверены, что живой организм действительно обладает им.

После того как эта книга была впервые опубликована, мне нередко приходили в голову возражения, начинавшиеся примерно так: «Наверное, ультрастабильная система не могла бы...». Но удивительно, как часто дальнейший анализ подсказывал мне ответ: «Да, но человек тоже не мог бы этого сделать!»

Глава 9

УЛЬТРАСТАБИЛЬНОСТЬ В ЖИВОМ ОРГАНИЗМЕ

9.1. В начале гл. 7 мы рассматривали элементарные факты, касающиеся адаптивного поведения котенка, и сопоставляли их с механистическим теоретическим построением — «ультрастабильной» системой. В настоящей главе мы рассмотрим ряд дальнейших элементарных соотношений между реальным организмом и теоретической конструкцией. В частности, мы попробуем выяснить, что можно сказать о простой теоретической схеме, представленной на фиг. 25. Насколько она соответствует реальному организму и реальной среде? При решении этого вопроса требуется осторожность, так как опыт показал, что поспешность в выводах, увы, слишком легко ведет к грубым ошибкам.

9.2. Мы должны особенно остерегаться представления о том, что схема непосредственных воздействий (например, фиг. 25) непременно дает нам картину того, что мы могли бы *увидеть* в нервной системе. От реальной «машины» можно абстрагировать не только множество различных систем, но точно так же и множество различных схем непосредственных воздействий, если экспериментатор исследует реальную «машину» с помощью разнообразных технических методов. Электрическая сеть, например, может дать весьма различные схемы функциональных связей, если ее исследовать сначала при медленно изменяющихся потенциалах, а затем при потенциалах, колеблющихся с высокой частотой. Иногда случается так, что два разных метода дают одну и ту же схему — скажем, при исследовании металлической сети сначала с помощью постоянных токов, а затем

с помощью осязания. В таких случаях мы радуемся, что нашли нечто простое; но мы не должны ожидать, что это будет происходить всегда.

Многие простые тела имеют одну схему, которая настолько очевидна, что мы склонны считать ее *единственной* спецификацией соединения частей. Эта схема строится на основе рассмотрения положения частей в трехмерном пространстве и изучения движений каждой части, происходящих при движении какой-либо другой части. Таким путем (пользуясь тем самым методом, который описан в § 4.12) как ученый, так и любой человек составляют себе представление о том, как соединены вещи в простом материальном, или анатомическом, смысле слова. Так, ребенок узнает, что когда он поднимает вверх один конец погремушки, другой конец тоже поднимается; так же анатом демонстрирует, что потягивание за определенное сухож лие в предплечье вызывает движение большого пальца. Эти операции позволяют установить схему непосредственных воздействий (схему связей), имеющую широчайшее распространение и огромное значение. Но мы должны остерегаться мысли о том, что это единственная схема: есть и такие системы, части или переменные которых не имеют определенного положения в пространстве друг относительно друга, но связаны динамически совершенно по-иному. Так обстоит дело, когда в колбе находится смесь ферментов, субстратов и других веществ и переменными служат *концентрации*. Здесь «система» — это комплекс концентраций, и схема непосредственных воздействий показывает, как эти концентрации влияют друг на друга. Такая схема, конечно, не показывает ничего, что касается конкретного распределения веществ в пространстве; она чисто функциональна. Все до сих пор сказанное нами не исключает того, что столь «анатомическая» с виду схема на фиг. 25, возможно, принадлежит к последнему типу. Мы должны быть осторожны.

9.3. Основная часть фиг. 25, требующая обсуждения,—это обратная связь, идущая от среды через сущест-

венные переменные и ступенчатые механизмы к реагирующей части R. Канал от среды к существенным переменным вряд ли будет интересовать нас, так как он зависит от практических деталей той обстановки, в которой в данное время находится свободноживущий организм.

Существенные переменные, определяемые генотипом (§ 3.14), часто имеют ясную анатомическую локализацию. Хорошо известно, например, что некоторые из них находятся в продолговатом мозгу; другие, например болевые сигналы, проходят, как установлено, через определенные участки в среднем мозгу и таламусе. Более точная идентификация этих переменных требует лишь более детального исследования.

Ступенчатые механизмы в организме

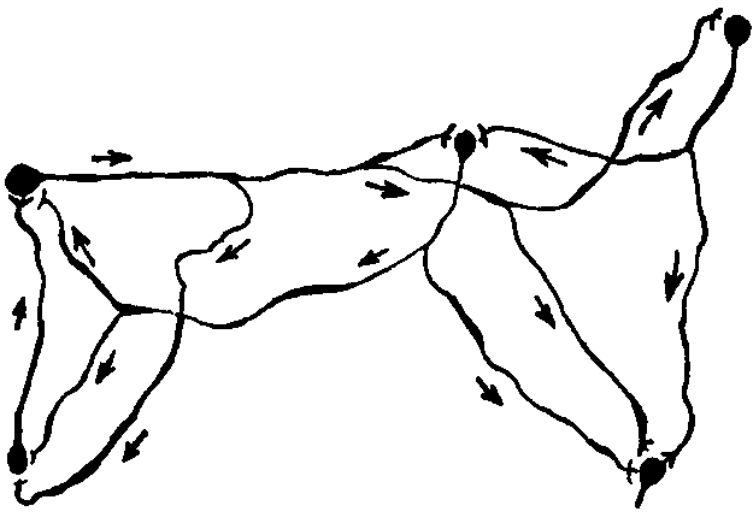
9.4. Совсем иначе обстоит дело со ступенчатыми механизмами. В настоящее время мы, в сущности, не имеем представления о том, где и что, собственно, мы должны искать. В этой области нам следует тщательно избегать неосознанно вводимых предположений, так как возможности очень широки.

Нам следует, например, остерегаться самой постановки вопроса о локализации ступенчатых механизмов: этот вопрос предполагает, что они должны где-то находиться, и это «где-то» легко может быть истолковано в анатомическом, гистологическом или каком-нибудь ином смысле, не подходящем к действительной переменной. Например, в некоторых вычислительных машинах запоминаемые данные хранятся в форме серии импульсов, циркулирующей по замкнутому пути, который включает ртутную линию задержки. Каждый импульс ведет себя как ступенчатая функция, так как он либо присутствует, либо отсутствует. Он *локализован* внутри последовательности, но *не имеет локализации* в какой-либо определенной части линии задержки. (Это «локализация» того же рода, какую имеют фраунгоферовы линии в спектре Солнца: они занимают опре-

деленное место в спектре, но не имеют специфического для них места в трехмерном пространстве.)

Помня об этих предостережениях, мы сделаем краткий обзор некоторых возможностей (перечень их почти наверное неполон, и в настоящее время, вероятно, важнее всего не упускать из виду, что могут возникнуть совершенно новые гипотезы).

9.5. Юнг давно уже высказал предположение, что замкнутая цепь нейронов могла бы нести круговой



Фиг. 41. Нейроны и их соединения в рефлекторной дуге тройничного нерва (полусхематически; из Лоренте де Но).

поток импульсов и этим поддерживать себя в возбужденном состоянии. Не будучи возбуждена, она оставалась бы в покое, а при возбуждении проявляла бы максимальную активность; такая система могла бы постоянно сохранять последствия какого-либо события.

Лоренте де Но собрал многочисленные гистологические данные о том, что нейроны образуют не только цепи, но и замкнутые циклы.

На фиг. 41 изображена схема, приведенная в одной из его статей. Такие циклы, или замкнутые цепи, настолько обычны, что Лоренте де Но сформулировал закон двусторонних связей: «если от клеточного комплекса *A* идут волокна к клеточному комплексу *B*, то и от *B* тоже идут волокна к *A*, либо непосредственно, либо через промежуточные нейроны».

Простая замкнутая цепь, будучи возбуждена, либо постепенно возвращается к состоянию нулевого возбуждения, если коэффициент усиления меньше единицы, либо достигает максимального возбуждения, если он больше единицы. Такой цикл долго сохраняет только две степени активности — нулевую и максимальную. Таким образом, его активность имеет форму ступенчатой функции, если можно пренебречь временем, необходимым для достижения максимального возбуждения. Критическими состояниями такой цепи можно считать наименьшее возбуждение, способное привести ее в полную активность, и наименьшее торможение, способное привести ее в бездействие. Мак-Куллок называл такие замкнутые цепи «эндромами» и исследовал некоторые их свойства.

9.6. Другой источник ступенчатых функций был бы возможен в том случае, если бы нейроны были амебоидными, так что их отростки могли бы устанавливать или разрывать контакт с другими клетками.

Амебоидность нервных клеток в культуре ткани известна еще со времени первых наблюдений Гаррисона. Когда нервную ткань куриного эмбриона выращивают на свернувшейся плазме, протоплазматические нити растут к периферии со скоростью около 0,05 *мм/час*. Нить оканчивается расширением величиной около 15×25 μ, которое осуществляет активные амебоидные движения — непрерывно выпускает отростки, как бы исследуя окружающую среду. Леви изучал тканевые культуры с помощью микроманипулятора, позволявшего раздражать отдельные клетки. Он нашел, что прикосновение кончика иглы к нервной клетке иногда заставляет ее выпускать отростки путем амебоидного движения.

Условия культуры тканей несколько отличаются от нормальных, и здесь нередки артефакты; но это возражение не относится к работе Шпейделя, который наблюдал нервные волокна, врастающие в хвост живого головастика. Концы волокон, так же как и в культуре ткани, обнаруживали амебоидную активность. Впослед-

ствии Шпейдель наблюдал действие метразола и обнаружил, что он вызывает активное сокращение, а затем вытягивание нервной клетки. Позднее Кэри и другие исследователи изучали двигательную концевую пластинку. Они и здесь обнаружили амебоидные свойства — после физического повреждения пластинка сжималась в шарик.

Амебоидное движение в ответ на раздражитель является, вероятно, древнейшей из реакций. Таким образом, гипотеза об амебоидности нейронов предполагает только то, что они до сих пор не утратили своего первоначального свойства. Поэтому возможно, что оно и лежит в основе действия ступенчатых механизмов.

9.7. Каждая клетка содержит много переменных, которые могли бы изменяться приблизительно по типу ступенчатой функции, особенно если время наблюдения велико по сравнению со средней продолжительностью клеточных процессов. Мономолекулярные пленки, растворы белков, ферментные системы, концентрации водородного иона и других ионов, окислительно-восстановительные потенциалы, адсорбированные слои и многие другие клеточные компоненты или процессы могли бы действовать как ступенчатые механизмы.

Если клетка достаточно чувствительна, чтобы реагировать на изменения, происходящие на атомном уровне, то такие изменения могли бы служить источником ступенчатых функций, так как они всегда имеют квантовый (т. е. скачкообразный) характер. Но этот источник, вероятно, следует исключить, так как изменения на этом уровне, возможно, слишком неопределенны, чтобы служить основой регулярного и воспроизводимого поведения, рассматриваемого в нашей книге (§ 1.14).

На поверхности нейрона, особенно его дендритов и аксонов, находится чувствительная мембрана, которая могла бы служить основой ступенчатого механизма, хотя она, вероятно, полностью «загружена» работой по передаче потенциалов действия. Нервные фибриллы описывались на протяжении многих лет, но все еще не исключена возможность, что это артефакт. Если они

существуют, то крайняя тонкость их структуры позволяет предполагать, что они тоже могли бы служить основой ступенчатых механизмов.

Часто указывают на хрупкость всей организации нервной системы. Эта хрупкость, несомненно, предполагает существование ступенчатых функций, ибо «хрупкий» означает, в сущности, «легко разрушающийся», а в § 7.19 мы уже видели, что в «разрушении» (или разрыве) чего-либо проявляется изменение величины ступенчатой функции. Хотя это по сути скорее «филологический» довод, он в какой-то степени оправдывает представление о том, что существование ступенчатых механизмов в нервной системе отнюдь не маловероятно.

> «Представление о постепенном, непрерывном развитии,— писал Жак Лёб,— несовместимо с общими физическими свойствами протоплазмы или коллоидного материала. Коллоидные вещества в нашей протоплазме обладают критическими точками... Коллоиды очень легко изменяют свое состояние, и многие условия... способны вызвать изменение в их состоянии. Такой материал весьма легко претерпевает ряд прерывистых изменений».

О возможной молекулярной основе памяти

9.8. Что *необходимо* для того, чтобы нечто материальное могло служить ступенчатым механизмом в ультрастабильной системе? Только то, чтобы оно было ступенчатым механизмом, могло изменяться под влиянием существенных переменных и оказывало эффективное действие на реагирующую часть R.

Головной мозг как динамическая система настолько чувствителен и служит таким мощным усилителем, что мы едва ли можем установить минимальную величину физического изменения, которое все еще способно существенно влиять на поведение. Даже изменение одной молекулы нельзя заранее счесть неэффективным, так как многие события в нервной системе решающим обра-

зом зависят от отношения некоторой переменной к порогу; вблизи порога очень малое изменение может иметь большие последствия.

Поэтому не исключена возможность, что основой ступенчатых механизмов служат события на молекулярном уровне. Есть множество факторов, которые могли бы играть такую роль: значение функции могло бы зависеть от того, является ли молекула *D*- или *L*-изомером и находится ли она в *цис*- или *транс*-форме, от наличия или отсутствия водородной связи, от того, в какой плоскости лежит двойная связь между атомами углерода, и т. д. Такая основа в живом организме обладала бы тем преимуществом, что обеспечивала бы нужную функцию при минимальном весе и объеме, а это имеет существенное значение для свободноживущего организма.

Полинг обсуждал эти возможности и предположительно наметил пределы, которые сузили бы область поисков. Если молекулярный субстрат слишком мал, тепловое движение не позволит ему сохранять постоянство, без которого он не мог бы служить основой такого поведения, какое наблюдалось у голубей Скиннера (§ 1.14). Если он слишком велик, он не сможет обеспечить того «чуда миниатюрности», которое фактически достигнуто в механизмах головного мозга млекопитающих.

9.9. Помня обо всех этих возможных формах ступенчатых механизмов, мы вряд ли сможем многое сказать с определенностью о каналах обратной связи, идущих от существенных переменных через ступенчатые механизмы к реагирующей части *R* на фиг. 25. Ясно, что нет ни малейшей *необходимости* в том, чтобы эти каналы состояли из анатомических или гистологических трактов: ведь если бы ступенчатые механизмы были молекулярными, то каналы *к ним* могли бы иметь биохимическую или гормональную природу; в то же время каналы *от них* к *R* могли бы быть чрезвычайно короткими и иметь почти любую природу, если бы они находились *внутри* нейронов, в которых они действуют.

Очевидно, нам потребуется добыть много новых сведений, прежде чем мы сможем точно идентифицировать эту часть обратной связи второго порядка. Сейчас важнее всего избегать таких представлений, при которых мы незаметно для себя принимаем за несомненный факт то, что еще не доказано.

Необходимы ли ступенчатые механизмы?

9.10. Начиная с § 7.12, мы рассматривали адаптацию при таких условиях, когда переменные, влияющие на реагирующую часть R (см. фиг. 25), ведут себя как ступенчатые функции. Мы оправдывали это тем, что такой случай имеет кардинальное теоретическое значение ввиду своей особой простоты и ясности: даже если бы в нервной системе вовсе не было ступенчатых механизмов, исследователь все-таки нашел бы рассмотрение этого случая полезным для того, чтобы ясно представить себе, как может адаптироваться нервная система. Но нет ли более серьезного оправдания? Может быть, есть данные, *доказывающие*, что процесс адаптации предполагает существование ступенчатых механизмов?

9.11. Мы уже видели (§ 7.16), что даже о таком типичном механизме, как телеграфное реле, нельзя сказать, что он *является* (обязательно) ступенчатым механизмом, так как при некоторых способах наблюдения (например, при исследовании изменений, происходящих в течение микросекунд или в течение ряд лет) такой формы поведения не обнаруживается; и нельзя считать, что какой-либо способ наблюдения имеет абсолютное преимущество перед другими. Даже если бы можно было заключить, что в «черном ящике» находится именно телеграфное реле, наблюдатель все-таки не мог бы утверждать, что это, безусловно, ступенчатый механизм.

9.12. Далее, по сравнению с полной функцией ступенчатая функция обладает поразительной простотой поведения; и не всякий реальный объект можно заставить обнаружить такую простоту. Значит, если мы скажем

об объекте, находящемся в «черном ящике», что его *можно* заставить обнаружить поведение типа ступенчатой функции, то мы выскажем о нем некую безусловную истину.

Точно так же, если мы найдем, что система трех переменных дает поле, показанное на фиг. 30 (где три возможных измерения сведены к двум двумерным плоскостям), то и здесь мы можем утверждать, что установили нечто особенное — поскольку полностью трехмерные поля (например, поле на фиг. 7) нельзя свести к такой простой форме.

Таким образом, некоторые виды поведения, не позволяющие сделать вывод, что они *непременно* обусловлены ступенчатым механизмом, позволяют тем не менее заключить, что в основе их лежит нечто, обладающее тем особым свойством, что поведение его *можно* свести к форме ступенчатой функции; а это уже некое положительное утверждение, ибо не всякое поведение можно представить в такой упрощенной форме.

9.13. Как же обстоит дело с нервной системой? Если бы переменные комплекса S (см. фиг. 25) изменялись как полные функции, наблюдатель видел бы лишь одну очень сложную систему, движущуюся по сложной непрерывной траектории к заключительному равновесию. Однако мы нередко видим, что организм «совершает пробу», т. е. обнаруживает какую-то определенную форму поведения и затем *придерживается* ее в течение некоторого времени. Затем он оставляет эту попытку, появляется новая форма поведения, которой он снова некоторое время придерживается, и так далее.

В таких случаях наблюдатель вправе утверждать, что система не полностью проявляет свою сложность; ибо тот факт, что проба на всем своем протяжении совершается именно в *данной* особой форме, означает, что здесь существует некоторая повторяемость — вроде того, что мы видим, например, в последовательности букв вида

FFFFFLLLLLLTTTTTJJJJJJ

в отличие от полностью беспорядочного их расположения в последовательности

EJYMSNASGCGHLAAPEYPJVRQJ.

Внутри каждой пробы, если в ней проявляется характерная форма поведения, можно определить поле; такие поля будут сменять друг друга в дискретной последовательности, как на фиг. 32. В таком случае, если наблюдатель предположит, что изменения поля происходят в единой системе, определяемой состоянием, то он имеет основание заключить, что параметры, ответственные за смену полей, обладают такой природой и связаны с главными переменными таким образом, что их *можно* представить ступенчатыми функциями (так как полные функции не могли бы дать дискретных переходов от одной характерной пробы к другой). То, что их *можно* представить в такой форме,— это существенное ограничение, касающееся их природы.

Соединим теперь этот вывод с так называемым принципом Данкова (согласно которому в системах, ставших эффективными в результате естественного отбора, разнообразие механизмов и пропускная способность каналов не будут значительно превышать необходимый минимум). Это позволит нам заключить, что в том случае, если организмы регулярно используют метод проб, весьма вероятно (хотя и не обязательно), что эти пробы будут контролироваться материальными факторами, многообразие которых (в сопоставлении с остальной частью системы) не будет значительно превышать необходимого минимума. Поэтому весьма вероятно, что существенные переменные комплекса S (фиг. 25) являются ступенчатыми функциями и что их материальный субстрат по самой своей природе хорошо приспособлен к таким функциональным проявлениям.

Формы обратной связи

9.14. Посмотрим теперь, насколько формулировки гл. 7 и схема на фиг. 25 соответствуют организации реального животного в отношении разделения обратных связей на две категории явно различного порядка: связь между организмом и средой через обычные сенсорные и двигательные каналы и связь, проходящая через существенные переменные и ступенчатые механизмы к реагирующей части R.

В гл. 7 применялась стратегия, описанная в § 2.17: мы пытались сделать типовую систему *предельно* ясной, чтобы она служила подходящей моделью для сравнения с нею многочисленных реальных систем, не соответствующих ей в точности. Чтобы создать ясную модель, мы предположили, что система (состоящая из организма и среды) подвергается внешним возмущениям только двух типов. К одному типу относится импульсное смещение величин главных переменных, которые переходят при этом в какое-то неравновесное состояние; это происходит, когда магнит гомеостата выводят из среднего положения (например, D_1 на фиг. 36) или когда огонь поблизости от котенка вдруг ярко разгорается. Тогда организм, если он адаптирован, проявляет свою адаптацию, предпринимая действие, соответствующее новому состоянию. Для того чтобы испытать или продемонстрировать адаптацию организма, нужен ряд таких импульсных воздействий с промежутками, необходимыми для реакции.

Ко второму типу относится такое возмущение, при котором изменяется какой-либо параметр всей системы (от величины, существовавшей на протяжении многих импульсных возмущений, он переходит к какой-то новой величине). Это изменение находится в совершенно ином отношении к системе, нежели изменение импульсного характера. В то время как импульс заставлял систему проявить стабильность, изменение параметра заставляет ее проявить (если это возможно) ультрастабильность. После импульса система демонстрирует

свою способность возвращаться в *состояние* равновесия, а после изменения величины параметра — свою способность вновь приводить поле (ее главных переменных) в стабильную *форму*. Поэтому ультрастабильная система — вполне пригодная «конструкция» для организма, если возмущения, приходящие к нему из внешнего мира, делятся на два ясно очерченных класса:

1) частые (или даже непрерывные) небольшие импульсные смещения главных переменных;

2) редкие, имеющие форму ступенчатой функции, изменения параметров.

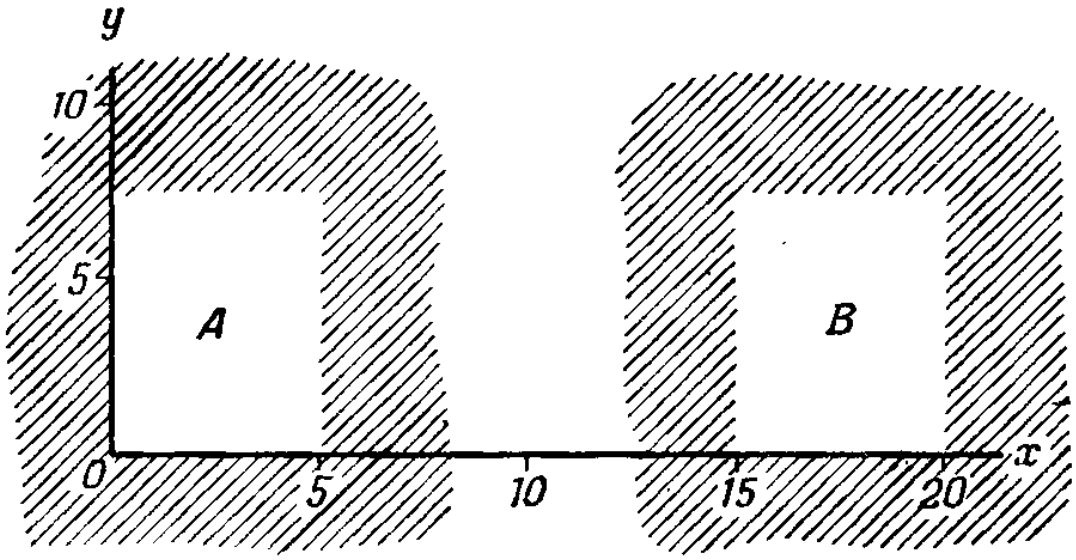
Таким образом, ультрастабильная система — это не просто дидактическое построение; в некоторых случаях она действительно может оказаться наилучшим механизмом, обеспечивающим выживание организма. *Если угрожающие организму возмущения на протяжении многих поколений имеют только что описанное бимодальное распределение, мы можем ожидать, что организм под действием естественного отбора выработает функциональную структуру, весьма близкую к ультрастабильной, т. е. будет иметь две ясно различимые формы обратной связи.*

9.15. Мы отнюдь не хотим сказать, что и в естественных условиях все раздражители, возмущения и задачи, с которыми встречается организм, так же четко разделены на две группы, как они были разделены в опытах с гомеостатом. Мы не предполагаем также, что в реальном мозге всегда можно увидеть ультрастабильную систему, стоит только найти правильный способ наблюдения. Напротив, мы, ученые, должны считать, что нам просто повезло, если мы находим, что сложную систему можно в теории разделить на ряд не слишком сложных подсистем, подобно тому как гомеостат можно разделить на «непрерывную» часть с обратными связями между магнитами и «ступенчатую» часть, содержащую вторую обратную связь. Если существует много петель обратной связи и нет удобного способа их индивидуализации, то упрощения достигнуть нельзя и нам

остается только рассматривать систему как одно чрезвычайно сложное целое. (Этот вопрос будет обсуждаться в гл. 11 и далее до конца книги.)

Контроль цели

9.16. Рассмотренные до сих пор ультрастабильные системы хотя и создавали множество различных полей, но преследовали одну постоянную цель. Гомеостат стремился к среднему положению магнитов, крыса — к нулевому потенциалу на решетке. В этом параграфе мы



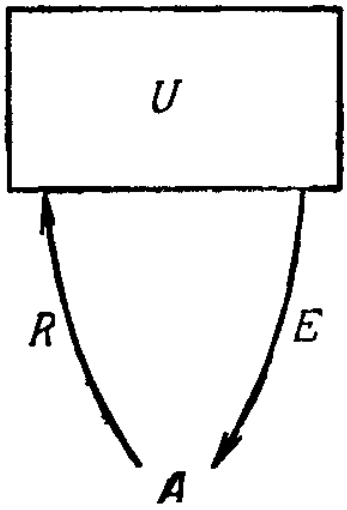
Фиг. 42.

опишем некоторые способы, позволяющие варьировать цель. Изменения цели важны в тех случаях, когда дело идет о подсобной цели, которую нужно достичь предварительно, на время, для достижения какой-то иной, постоянной цели (§ 3.15).

Если распределение критических состояний в фазовом пространстве главных переменных по какой бы то ни было причине изменилось, ультрастабильная система изменит цель, к которой она стремится: она всегда будет создавать поле, удерживающее репрезентативную точку внутри участка, окруженного областью критических состояний (§ 7.23). Если, например, по какой-либо причине область критических состояний будет

окружать B, а не A, как было раньше (фиг. 42), то конечное поле изменится так, что оно будет удерживать x в пределах от 15 до 20, а не от 0 до 5, как раньше.

Сходный метод показан на фиг. 43. Ультрастабильная система U взаимодействует с переменной A. Стрелками E и R представлены непосредственные воздействия U и A друг на друга; их можно мыслить себе как эффекторы и рецепторы системы U. Если окажется, что A оказывает на ультрастабильную систему существенное воздействие,



Фиг. 43.

то система, конечно, выработает поле, стабилизирующее A на каком-то определенном уровне, который в большой степени будет зависеть от действия R. Предположим, например, что все критические состояния U наступают при значениях главных переменных 0 и 10, так что система всегда выбирает поле, стабилизирующее все главные переменные в пределах между этими величинами. Если действие рецептора R таково, что при некотором значении A, равном a, рецептор передает системе U величину $5a—20$, то легко видеть, что U выработает поле, удерживающее A в пределах 5 ± 1: если поле позволит A выйти из этих пределов, то U выйдет из пределов от 0 до 10, а это приведет к разрушению поля. Поэтому U становится системой, «ищущей 5». Если теперь R изменится и будет передавать не $5a—20$, а $5a+5$, то U будет изменять поле до тех пор, пока оно не начнет удерживать A в пределах 0 ± 1; система U

теперь «ищет 0». Таким образом, любой фактор, контролирующий b в выражении $R=5a+b$, контролирует цель, которую ищет U.

Рассмотрим более конкретный пример. Предположим, что система U подвижна и ультрастабильна и что ее критические состояния установлены так, что она ищет условия высокой освещенности; тогда область ее критических состояний должна быть сходна скорее с B, чем с A (см. фиг. 42). Предположим также, что R — луч света. Если на пути R мы поместим красный светофильтр, то зеленый свет будет действовать так же, как отсутствие света, и система будет активно искать «красные» места и избегать «зеленых» мест. Если мы теперь просто заменим красный фильтр зеленым, вся цель ее движений изменится, так как сейчас она будет искать «зеленые» места и избегать «красных».

Предположим теперь, что R — устройство, преобразующее температуру в области A в освещенность, которую оно создает для системы U. Если R устроено так, что высокая температура области A преобразуется в высокую освещенность, то U будет активно искать теплые места. Если же соотношение внутри R изменить на обратное, то U будет искать холодные места. Очевидно, все, что контролирует R, будет контролировать и цель системы U.

Поэтому, вообще говоря, совершенно не трудно объяснить тот факт, что система может в различное время искать разные цели.

Иногда изменение критических состояний или преобразователя R может находиться под контролем одного параметра. В таких случаях мы должны различать два рода сложности. Предположим, что параметр может принимать только два значения и что система U очень сложна. Тогда система проста в том отношении, что она будет искать одну из двух (не более) целей, и сложна в том отношении, что поведение, с помощью которого она достигает цели, сложно. Сложность поведения не доказывает, что отношение параметров к системе должно быть сложным, и даже не служит косвенным указа-

нием на это: как было показано в § 6.3, число полей равно числу значений, которые может принимать параметр, и никак не связано с числом главных переменных. А именно последнее, как правило, определяет сложность поведения при поисках цели.

Эти соображения, возможно, помогут лучше понять связь между изменением концентрации полового гормона в крови млекопитающего и последующим целенаправленным сексуальным поведением животного. Простой переход от «отсутствия» к «присутствию» (или обратно) или от одного уровня к другому при наличии порога был бы достаточен для того, чтобы объяснить смену двух форм поведения любой степени сложности, так как сложность следует связывать не с гормональным параметром, а с нервной системой, на которую он влияет. Поскольку нервная система млекопитающего необычайно сложна и поскольку она почти в каждом своем пункте чувствительна как к физическим, так и к химическим воздействиям, нет, по-видимому, никаких оснований предполагать, что определяющее влияние половых гормонов на поведение головного мозга существенно отличается от влияния любого параметра на управляемую им систему. (Способность половых гормонов специфически вызывать сексуальное поведение, конечно, можно объяснить тем, что в ходе эволюции в результате естественного отбора выработались специфические механизмы, реагирующие на гормон таким специфическим образом.)

Генотип и ультрастабильность

9.17. Теперь мы можем вернуться к вопросу, поставленному в § 1.9: какую роль играет генотип среди факторов, определяющих процесс адаптации?

Приняв за основу схему непосредственных воздействий, изображенную на фиг. 25, мы сможем без труда ответить на этот вопрос, если последовательно рассмотрим все части и каналы системы.

Предполагается, конечно, что среда выбрана произвольно, так же как и канал, через который она влияет на существенные переменные (§ 7.3). Существенные переменные и их пределы определяются генотипом (§ 3.14), ибо это видовые характеристики организма.

В живом организме реагирующая часть R фактически имеет входные величины троякого рода: сенсорные данные, получаемые от среды, параметры, находящиеся в S, и параметры, которые были наследственно определены в ходе эмбрионального развития. (То, что все три группы величин можно считать «входными», показано во «Введении в кибернетику», § 13/11.) Эти три группы параметров изменяются с весьма различной скоростью: генетические параметры, благодаря которым в одном случае возникает мозг собаки, а в другом — мозг птицы, проявляются в жизни организма лишь однажды, в определенный ее период; параметры комплекса S, если адаптация совершается путем ясно отграниченных проб, изменяются только от одной пробы к другой; параметры сенсорного входного канала изменяются более или менее непрерывно. Таким образом, влияние генотипа можно обнаружить в части R, в которой он создает известные анатомические пути, биохимические процессы и гистологические структуры, определяя тем самым, будет ее адаптация характерной для собаки или для морской звезды.

Природа параметров S находится всецело под генетическим контролем, так как их физическое воплощение было надлежащим образом отобрано в ходе эволюции по признаку целесообразности. (Здесь следует ясно отличать *природу* параметров — т. е. являются ли они реверберирующими цепями или молекулярными конфигурациями и т. д.— от *значений*, которые может принимать тот или иной параметр.)

Наконец, есть определенная связь между существенными переменными и параметрами группы S — когда существенные переменные находятся вне своих физиологических пределов, они должны вызывать изменение параметров S, в противном же случае должны препят-

ствовать их изменению (§ 7.7). Поскольку эта связь присуща всем живым организмам, она должна определяться генотипом, так как другого источника для ее выбора нет.

Именно этими путями и должно осуществляться действие генотипа как детерминанта приспособительных механизмов живого организма.

9.18. Теперь нужно ответить на вопрос, есть ли основания предполагать, что ультрастабильность — в том виде, как она здесь описана,— выработалась путем естественного отбора; ибо ее особенности, отмеченные в предыдущем параграфе, не имеют никакого другого детерминанта, который позволил бы объяснить их выбор и «настройку» соответственно назначению.

Для того чтобы естественный отбор привел к выработке ультрастабильности, необходимо и достаточно, чтобы существовала последовательность форм от самой простой до самой сложной, причем каждая последующая форма должна давать лучшие шансы на выживание, чем предыдущая. Другими словами, ультрастабильность должна становиться полезной для организма не только тогда, когда какая-то сложная приспособительная система уже обладает одновременно всеми компонентами и их правильными соотношениями (ибо такое событие возможно лишь в редком случае).

Предположим, что исходный организм не имел ступенчатых механизмов; такой организм обладал бы постоянным, не меняющимся набором реакций. Если бы какая-то мутация привела к возникновению одного ступенчатого механизма, критические состояния которого были бы таковы, что в случае нарушения нормальных функций организма ступенчатая функция изменяла бы свое значение *до того*, как существенные переменные выйдут из своих пределов, и если бы этот ступенчатый механизм каким-то образом влиял на взаимодействие организма со средой, то такой ступенчатый механизм мог бы увеличить шансы на выживание организма. Поэтому одиночная мутация, вызвавшая появление

одного ступенчатого механизма, могла бы оказаться полезной, и эта ее полезность, хотя бы и незначительная, могла бы быть достаточной для закрепления мутации как видового признака. Затем вторая мутация могла продолжить этот процесс. Таким образом, переход от первоначальной системы к ультрастабильной может совершиться путем длинного ряда небольших изменений, каждое из которых повышает шансы на выживание. Значит, такой переход может происходить под действием естественного отбора.

Выводы

9.19. Решение проблемы, поставленной в гл. 1, теперь в основных чертах завершено. Его можно резюмировать следующим образом.

В типовой проблеме, рассмотренной в § 1. 17, возмущения, воздействующие на организм, делятся на два весьма различных класса (т. е. распределение их бимодально). К первому классу относятся небольшие, частые импульсные возмущения, влияющие на главные переменные, ко второму — значительные, редко происходящие возмущения, вызывающие изменения типа ступенчатой функции в параметрах реагирующей части. К последнему классу относятся и серьезные нарушения эмбриогенеза, при которых организм вступает в жизнь с настолько расстроенной организацией головного мозга, что требуется коррекция (в этом отношении процессы научения и адаптации сходны, так как одно и то же решение пригодно в обоих случаях).

При таком распределении возмущений эффективным (т. е. способным удерживать существенные переменные в физиологических пределах) будет такой регулятор, распределение обратных связей которого будет соответственно бимодальным. У него будут обратные связи, дающие стабильность по отношению к частым импульсным отклонениям главных переменных, и более медленно действующая обратная связь, обеспечивающая

изменения типа ступенчатой функции, которые дают стабильность в отношении редких сдвигов ступенчатого типа.

Такого рода целое можно рассматривать просто как один сложный регулятор, стабильный в отношении сложного (бимодального) комплекса возмущений. Его можно также рассматривать как регулятор первого порядка (компенсирующий малые импульсные отклонения), способный реорганизовать себя так, чтобы достичь той же стабильности после нарушения эмбриогенеза или после существенного изменения условий, уничтожившего его стабильность. Когда биолог рассматривает систему с этой второй точки зрения, он говорит, что организм чему-то «научился», и отмечает, что в результате научения поведение всегда «улучшается».

9.20. Таково в общих чертах наше решение. Однако читатель, вполне возможно, чувствует, что количество информации, данное этим решением, невелико.

Обобщенность характеристики ультрастабильной системы, почти полное *отсутствие* конкретных деталей в известной мере оправданы. К проявлениям адаптации способен гораздо более широкий круг систем, нежели организмы класса млекопитающих и структуры типа головного мозга, и любое предложенное решение было бы явно неверным, если бы в нем утверждалась необходимость, скажем, миелина, которого гомеостат определенно не содержит. Поэтому обобщенность или, если угодно, расплывчатость понятия ультрастабильной системы с этой точки зрения вполне правомерна и неизбежна.

Однако при попытках применить нашу общую формулировку к реальной нервной системе мы быстро сталкиваемся с большими трудностями. В чем они состоят и как их можно преодолеть — этим вопросам посвящена вся остальная часть книги.

Глава 10

ПОВТОРЯЮЩАЯСЯ СИТУАЦИЯ

10.1. В предыдущей главе мы закончили исследование вопроса о том, как организм переходит из неадаптированного состояния в адаптированное. Но этот простой вопрос и его решение — всего лишь первый шаг на пути к пониманию живого, в особенности человеческого, мозга. К простой ультрастабильной системе мы должны, очевидно, добавлять новые усложнения. Например, живой организм не только приобретает адаптацию, но достигает этого с помощью процесса, обнаруживающего признаки эффективности (в том смысле, что путь к адаптации не слишком далек от такого пути, который требовал бы минимума времени, энергии и риска). Хотя мы еще не говорили о том, что, собственно, следует понимать под «эффективностью» такого рода процессов, вряд ли кто станет отрицать, что адаптационный процесс гомеостата производит впечатление малоэффективного. Но прежде чем приняться за его «усовершенствование», мы должны уяснить себе наши исходные предположения.

10.2. Вернемся к первым принципам. Смысл слов «успех» или «адаптация» заключается для организма в том, что, несмотря на самые неблагоприятные внешние условия, реакция организма была такой, что он смог выжить в течение времени, необходимого для размножения.

Далее, «внешние условия» можно рассматривать как единое, действующее на протяжении всей жизни и очень сложное Большое Возмущение (см. «Введение в кибернетику», гл. 10), на которое организм отвечает единой, совершающейся в течение всей жизни и тоже

очень сложной Большой Реакцией; от их соотношения зависит Большой Результат — успех или неудача. В самом общем случае связь частичных возмущений, составляющих Большое Возмущение, и частичных реакций, составляющих Большую Реакцию организма («Введение в кибернетику», § 13/8), может быть любой — от нулевой до полной. (Взаимосвязь является «полной», когда Большой Результат представляет собой функцию *всех* частичных реакций; она соответствовала бы чрезвычайно сложной зависимости между частичными реакциями и конечным результатом.)

Случай полной взаимосвязи, фундаментальный с точки зрения теории (ввиду его полной общности), не имеет большого практического значения, так как встречается в земных условиях редко (хотя он, возможно, более обычен в моделях или в процессах адаптации, осуществляемых большими вычислительными машинами). Будь он обычным случаем, головной мозг был был бесполезен («Введение в кибернетику», § 13/5). В сущности, головной мозг выработался именно потому, что в земных условиях организм встречается с Большим Возмущением, составные части которого значительно ограничены в своей свободе, из чего организм может извлечь пользу. Таким образом, организм сталкивается с миром, повторяющим себя и в известной мере последовательным в подчинении законам, т. е. с миром, в котором отсутствует полная хаотичность. Чем выше степень этого ограничения свободы, тем больше организм может специализироваться, приспособляясь к определенным формам среды, существующим в действительности. По мере специализации его эффективность в отношении данной формы среды будет возрастать. Если читателю кажется, что такая ультрастабильная система, какую мы до сих пор описывали, чрезвычайно малоэффективна, то это потому, что она еще совершенно не специализирована, а читатель невольно пытается представить себе ее действие в условиях, многообразие которых он как-то ограничил, хотя о таких ограничениях в этой книге еще прямо не говорилось.

10.3. В последующих главах мы рассмотрим некоторые чрезвычайно распространенные ограничения и покажем, как соответствующие формы специализации иллюстрируют сделанные выше предположения. Мы увидим, каким образом различные формы ограничений, суживающих многообразие обычных земных условий среды, подсказывают возможные пути специализации живых организмов, позволяющие им извлечь пользу из этих ограничений.

Повторяющаяся ситуация

10.4. В этой главе мы рассмотрим чрезвычайно важный в реальной жизни случай, когда возмущения второго типа (более редкие, см. § 9.14) иногда повторяются и когда реакция, если она адаптивна в первый раз, будет адаптивной также и при втором, третьем и последующих появлениях того же возмущения.

Мы не должны считать само собой разумеющимся, что одна и та же реакция будет адаптивной при всех появлениях одинакового возмущения, так как есть случаи, в которых подходящий ответ на возмущение зависит от того, сколько раз оно появлялось раньше. Очень яркий пример дает крыса в среде (естественной, согласно § 3.1), в которой две ночи подряд в одном и том же месте появляется пища, а на третью ночь — смертельная смесь той же пищи с ядом (метод «предварительной приманки»). Подобным средам присуща внутренняя сложность. Полная адаптация здесь (при сделанных нами предположениях) требует такой последовательности реакций: «съедать — съедать — воздерживаться». Эта последовательность сложнее, чем простая реакция поедания пищи или воздержания от нее, так как три компонента должны находиться в определенном отношении и составлять единое целое.

В этой главе мы рассмотрим иной случай — случай частого повторения, при котором адекватная реакция на возмущение зависит от его природы, а не от того,

какое место оно занимает в последовательности возмущений.

До сих пор мы показывали (например, на графиках всей гл. 8) действие такой ультрастабильной системы (представленной, скажем, гомеостатом), в которой параметры изменяются так, что последующая величина просто отличается от предыдущих; теперь мы рассмотрим случай, когда параметр последовательно принимает ряд значений, например

$$P_2P_8P_2P_1P_6P_4P_6P_1P_2\ldots,$$

в котором встречаются нерегулярные повторения и когда реакция, скажем на P_2, будучи адаптивной при первом появлении P_2, остается адаптивной и при последующих появлениях той же величины.

В таком случае есть возможность извлечь пользу из того, что при последующих появлениях величины P_2 на нее можно реагировать сразу же, не нуждаясь во второй серии проб и ошибок.

Этот случай особенно важен потому (§ 8.10), что он включает частный случай, в котором изменения величины P соответствуют переходам от одной среды к другой. Предположим, например, что «дикая» крыса адаптируется сначала к условиям конюшни (P_2), затем к условиям находящегося поблизости амбара (P_8) и т. д. Приспособившись к конюшне, а затем к амбару, она, очевидно, имела бы больше шансов на выживание, если бы, вернувшись в конюшню, могла сразу же вновь проявить те адаптации, которые у нее там выработались раньше. Организм, обладающий такой способностью, может *накапливать* адаптации.

10.5. Чтобы выяснить необходимые для этого условия, посмотрим, что происходит в гомеостате. Небольшое размышление или действительно проведенный опыт быстро покажет, что данная модель полностью лишена такой способности к накоплению. Например, обратное переключение R_2 (см. фиг. 36) восстанавливает внешние условия, к которым гомеостат уже был адаптирован раньше (D_1); однако после событий, последовавших

за первым переключением (R_1), прежняя адаптация (D_1) была полностью утрачена, и гомеостат реагирует на ситуацию, возникшую после R_2, так, как если бы она создалась впервые.

Вообще, если перед гомеостатом поставлена проблема A, затем проблема B, а потом снова A, то во второй раз он подходит к решению проблемы A так, как будто никогда раньше не встречал ее; процесс адаптации к B полностью уничтожил предшествующую адаптацию к A. (Психолог сказал бы, что ретроградное торможение было полным — см. § 16.12.)

Этот способ адаптации к проблеме A при ее втором появлении нельзя улучшить, если среда не содержит никаких указаний на то, что вторая реакция на A должна быть такой же, как и первая. Поведение гомеостата в этом случае можно было бы описать как поведение системы, которая «не делает выводов» и «подходит к каждой новой ситуации так, как она того заслуживает». В мире, основанном на методе предварительной приманки, гомеостат был бы эффективнее мозга крысы! Но тогда, когда среде *действительно* свойственны ограничения, предположенные в этой главе, гомеостат неспособен использовать их. Как видоизменить его, чтобы он приобрел эту способность?

10.6. У гомеостата, в сущности, есть небольшой ресурс для приспособления к повторным ситуациям, но практическая польза его невелика. Из § 8.10 мы видели, что конечное поле гомеостата стабильно во всех ситуациях, так что переход от одной ситуации к другой не требует новых проб.

10.7. Этот метод, однако, не может быть широко использован для адаптации в реальной жизни по двум причинам. Во-первых, когда число параметров становится сколько-нибудь значительным, время, необходимое для отыскания подходящего набора значений ступенчатых функций, возрастает сверх всякой практически приемлемой меры (об этом мы будем подробнее говорить в гл. 11). Во-вторых, адаптация, даже если она достигнута, будет надежной лишь при определенном ограни-

ченном наборе значений параметров, т. е. до тех пор, пока не появится новое значение. Стоит ему появиться, как все снова идет «в переплавку» и приспособление к новому набору значений (прежний набор плюс одно новое значение) должно начинаться сначала. Повседневные наблюдения, разумеется, показывают, что каждая новая адаптация не уничтожает всех прежних; очевидно, метод, описанный в § 8.10, практически почти бесполезен.

Аккумулятор адаптаций

10.8. Для того чтобы выяснить, что́ здесь необходимо, примем за нечто несомненное способность организмов вырабатывать новые адаптации без нарушения старых и посмотрим, какие видоизменения мы должны будем тогда внести в формулировку, данную в § 7.5. Итак, предположим, что организм адаптировался к величине P_1, затем (путем проб и ошибок, как описано в § 7.23) к P_2, а когда величина P_1 появилась снова, он оказался адаптированным к ней *сразу же*, без дальнейших проб. К какому заключению можем мы прийти на основе этого предположения?

(Соображения, приведшие к выводам, сделанным в § 7.8, применимы здесь без изменений, так что мы можем считать несомненным, что адаптация к каждой отдельной величине P происходит с помощью второй обратной связи, причем существенные переменные управляют ступенчатыми функциями так, как было показано в § 7.7. Необходимое видоизменение можно найти, непосредственно применяя метод, описанный в §4.12, и наблюдая, ведет ли изменение одной переменной к изменению другой.)

Для того чтобы можно было проследить всю аргументацию, выделим две подгруппы ступенчатых функций комплекса S, влияющих на R (фиг. 25):

S_1 —те ступенчатые функции, изменение величины которых при $P=P_1$ вызвало бы утрату адап-

тации к P_1 (т. е. те, которые действуют на R, когда P имеет величину P_1);

S_2 — те ступенчатые функции, которые необратимо изменили свою величину после проб, приведших к адаптации в отношении P_2.

Из этого прежде всего следует, что S_1 *и* S_2 *не имеют общих членов*. Ибо если бы такой общий член существовал, то он (как член группы S_2) изменил бы величину при втором появлении P_1 и тем самым (как член группы S_1) реакцию на P_1 при вторичном появлении P_1, что противоречит гипотезе. Следовательно, для сохранения адаптации к P_1 после адаптации к P_2 ступенчатые механизмы должны распадаться на *отдельные классы*.

(То, что ступенчатые механизмы должны делиться на классы, станет более понятным, если мы представим себе, что ступенчатые механизмы всякой ультрастабильной системы *несут информацию* о *предшествовавшем поведении существенных переменных*. Для того чтобы при втором появлении P_1 поведение было *с самого начала* адаптивным, нужна информация о том, как существенные переменные вели себя в прошлом (так как, согласно гипотезе, сами они не должны давать этой информации). Значит, где-то в системе эта информация должна храниться и запасы ее не должны быть доступны для воздействия P_2, иначе последующие события повлияют на них и информация будет переписана заново. Таким образом, должны существовать отдельные места ее хранения для P_1 и P_2, а также приспособление для их раздельного использования.)

Рассмотрим теперь канал, идущий от существенных переменных. В состоянии P_2 канал, ведущий от них к ступенчатым механизмам S_2, был, очевидно, открыт, так как изменения существенных переменных (внутри или вне физиологических пределов) повлияли на то, что происходило в S_2 (в ходе обычных процессов адаптации). Вместе с тем канал от существенных переменных к ступенчатым механизмам в S_1 был, очевидно, в это время закрыт, так как за изменениями первых не

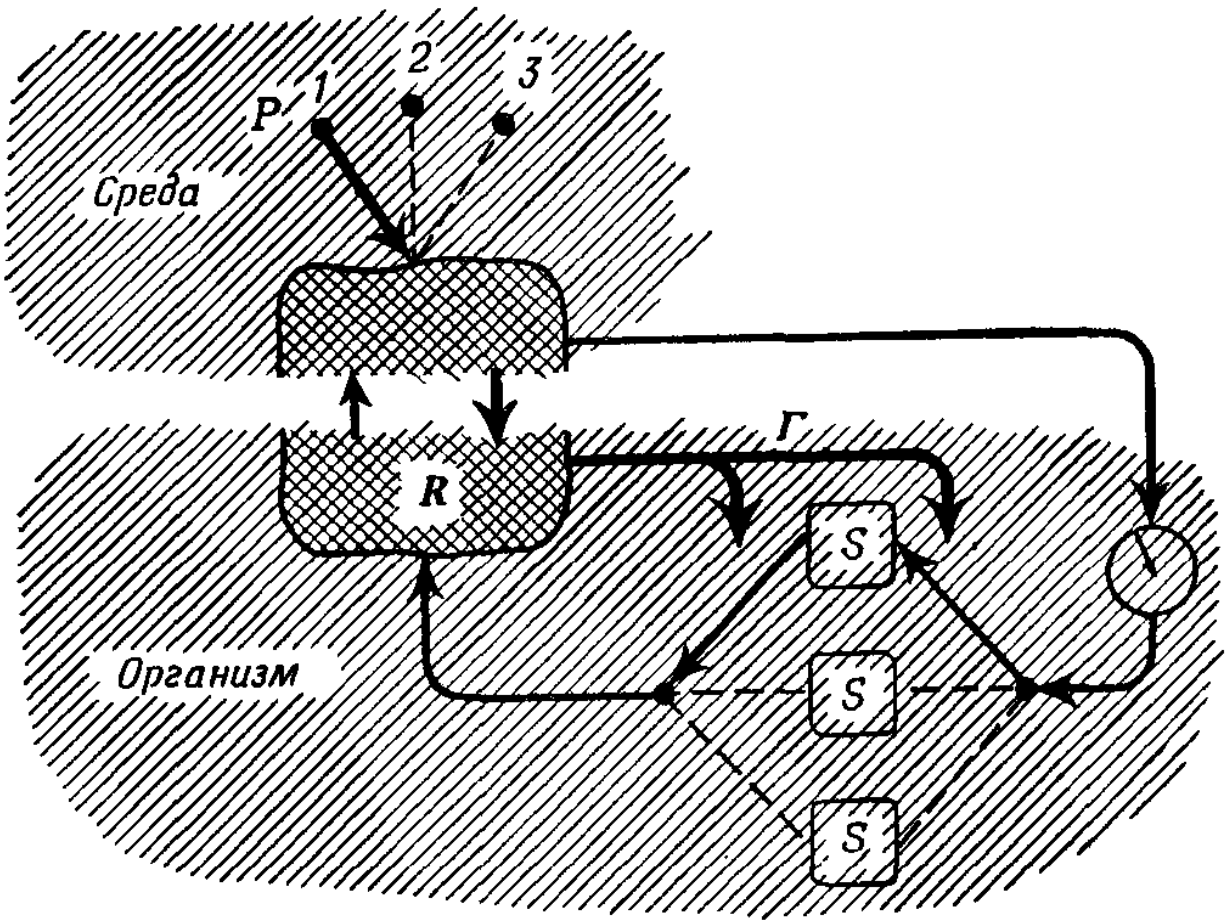
последовало *никаких* изменений вторых. Таким образом, канал от существенных переменных к ступенчатым механизмам S должен делиться на части, с тем чтобы одни могли передавать, а другие не передавать информацию; какие из этих частей будут передавать информацию, должно зависеть, по крайней мере частично, от состояния P, изменяющегося при переходе от P_1 к P_2 и обратно.

Рассмотрим, наконец, каналы от S_1 и S_2 к реагирующей части R. Когда P_1 появляется во второй раз, канал от S_2 к R, очевидно, закрыт, так как, несмотря на изменение параметров в S_2 (до и после P_2), никакого изменения в поведении R не происходит (согласно гипотезе). Вместе с тем канал от S_1 к R, очевидно, открыт, ибо именно величины S_1 определяют поведение при P_1 — его адаптивную форму, которая в данный момент реализуется.

10.9. Подведем итоги. Пусть нам дано, что организм адаптировался к P_1 путем проб и ошибок, затем таким же образом адаптировался к P_2, а когда условия P_1 появились вторично, обнаружил адаптацию сразу же, без дальнейших проб. Из этого мы можем заключить, что ступенчатые механизмы *должны* делиться на отдельные классы, не имеющие общих членов, что реакции на P_1 и на P_2 должны быть обусловлены двумя разными классами ступенчатых механизмов и что появление проблемы (т. е. какой-то величины P) должно определять класс ступенчатых механизмов, который приводится в функциональную связь, тогда как остальные классы остаются функционально изолированными.

Таким образом, если взять за основу схему, изображенную на фиг. 25, то ее нужно видоизменить так, чтобы ступенчатые механизмы были разбиты на группы; кроме того, должен существовать какой-то «стрелочный» механизм, определяющий, какая из групп будет включена в цепь обратной связи, причем этот стрелочный механизм должен управляться (обычно через R, поскольку такова структура организма) величиной P.

На фиг. 44 представлена соответствующая схема непосредственных воздействий, но ее лучше всего рассматривать просто как мнемоническую схему функциональных связей, чтобы она не подсказывала чересчур навязчиво то или иное анатомическое воплощение. Параметр P может быть установлен на различных величинах P_1, P_2... Ступенчатые механизмы разделены на классы, и показан стрелочный механизм Γ, управляемый величинами P через среду и реагирующую



Фиг. 44.

часть R, которые определяют, какой из классов должен действовать во второй обратной связи, проходящей через существенные переменные.

10.10. Схема, изображенная на фиг. 44, и поведение стрелочного механизма могут показаться несколько сложными, но мы не должны видеть в них больше сложности, чем это необходимо. А *необходимо* только то, чтобы ступенчатые механизмы, относящиеся к любой данной проблеме P_i, были отличны от ступенчатых механизмов, относящихся к другим проблемам, чтобы в

случае влияния существенных переменных на класс S_i этот класс механизмов действовал на R и чтобы существовало соответствие между проблемами и классами ступенчатых механизмов. Это последнее соответствие не обязательно должно быть упорядоченным или «рациональным»; оно вполне может быть установлено случайным образом (т. е. может определяться факторами, которые нас сейчас не интересуют) — при одном лишь условии, что если при появлении определенной проблемы P_i функциональная цепь приводит к некоторому классу S_i, то при повторном появлении P_i она всегда должна снова вести к S_i. Такая ситуация имела бы место в том случае, если бы связи были, например, электрическими и устанавливались путем замыкания их на доске коммутатора. Однажды установленные, они обеспечивали бы при каждом повторении P_i одну и ту же схему для выбора S_i, а переход от P_i к какой-нибудь другой проблеме, скажем к P_j, вызывая изменения сенсорных входных величин для R, приводил бы к какому-то изменению в распределении связей, идущих через ступенчатые механизмы.

Точно так же, если бы нервные клетки росли случайным образом (т. е. рост их определялся бы местными, вре́менными различиями в снабжении кислородом, в механических силах и т. п.) до тех пор, пока не будут фиксированы гистологические детали, и если бы пути нервных импульсов зависели от сочетаний приходящих раздражителей, то повторение P_i всегда открывало бы им путь к S_i, а переход от P_i к P_j, изменяя сенсорные раздражители, изменял бы и распределение импульсов.

Простой механизм, способный обеспечить «стрелочную» функцию Γ, указан в § 16.13.

Эти детали не должны задерживать нас. Они упомянуты лишь для того, чтобы показать, что основные требования легко могут быть удовлетворены и что структура отвечающих им механизмов может выглядеть далеко не такой четкой, какой она кажется на фиг. 44. В этом смысле данная схема, будучи в некоторых

отношениях полезной, легко может ввести в серьезное заблуждение. Мы вернемся к этому вопросу в § 16.12.

10.11. В предыдущих параграфах различные ситуации P_1, P_2, P_3 ... были произвольными и между ними не предполагалось никакой определенной связи. Особый случай, достаточно частый, чтобы представлять интерес, имеет место тогда, когда определенные ситуации обычно возникают в определенной последовательности. Например, когда маленький ребенок тянется через стол за печеньем, он должен сначала пронести свою руку мимо края стола, не ударившись о него, затем мимо чашки, не опрокинув ее, затем мимо варенья, не испачкав рукав, и т. д.; это последовательный ряд действий, каждое из которых требует известной адаптации. Значительная часть жизни состоит именно из таких последовательностей.

Система, представленная на фиг. 44, легко может осуществлять такие ряды действий, каждое из которых приспособлено для решения своей собственной небольшой задачи. Ситуация с движением руки около края стола и с опасностью удариться о него — это, скажем, P_1. Приспособление к ней может совершаться обычным путем, с помощью основного метода ультрастабильной системы. Движение рукава над открытым вареньем — это другая ситуация, P_2; к ней тоже может произойти адаптация. При этом изменения, необходимые для адаптации к P_2, в нашей новой системе не вызовут потерю адаптации к P_1.

Возможность приспособления ко всей ситуации в целом путем таких последовательных частных адаптаций (к P_1, к P_2 и т. д.) зависит *от среды*: только определенные типы сред допускают подобную разбивку на части. Если такие типы часто встречаются в жизни организма, то данный вид будет иметь преимущество в эволюции, если он структурно преобразуется так, что каждая особь получит наследственный механизм, сходный с представленным на фиг. 44.

10.12. Чтобы развить эту мысль, мы можем рассмотреть случай, когда организм живет в среде, состоящей

из многих различных в сенсорном отношении ситуаций, причем требованиям каждой из них отвечает одна из двух реакций (скажем, пожирание или бегство); тогда жизненная проблема организма состоит в том, чтобы для каждой из многочисленных ситуаций выбрать одну из этих двух реакций. При такой среде реагирующая часть R (на фиг. 25 или 44) могла бы иметь очень малые размеры, так как здесь достаточен механизм, способный осуществлять только два рефлекса. Однако запас ступенчатых механизмов должен быть обширным, а стрелочный механизм $Г$, быть может, очень сложным; здесь должно быть столько записей информации, сколько имеется сенсорных ситуаций. Каждая запись должна храниться в определенном месте, а стрелочный механизм должен обеспечить наличие функциональной цепи, ведущей от каждой ситуации к месту хранения соответствующей записи. Поэтому можно ожидать, что в подобном мире организм будет иметь мозг с иным соотношением частей, нежели мозг организма, живущего в таких условиях, в какие был поставлен гомеостат.

Биологу, вероятно, не слишком трудно было бы найти вид, живущий в такой среде. Исследование нервной системы в этом случае, возможно, позволило бы установить весьма важные соответствия.

10.13. Можно возразить, что функциональная схема, рассмотренная в этой главе, слишком неопределенна для того, чтобы помочь исследователю, который хочет найти соответствующий механизм, например, в головном мозгу человека. На это следует ответить, что такая неопределенность вполне оправданна, ибо данный нам факт — способность к накоплению адаптаций — позволяет выделить лишь чрезвычайно обширный класс механизмов, и поэтому возможно огромное разнообразие реальных машин, способных к накоплению адаптаций. Но если все они способны к этому, то любой анализ был бы явно неверным, если бы он без дополнительных *данных* указывал на какую-то одну машину.

Как показали наши рассуждения, мы должны расстаться с наивным убеждением, что необычайные внеш-

ние проявления адаптации связаны с каким-то уникальным мозговым механизмом или что они позволяют найти единственно возможное объяснение особенностей живого мозга. Многие из этих особенностей нельзя однозначно связать с процессами адаптации: такие процессы совершаются и в системах, лишенных этих нейрофизиологических особенностей, в системах, весьма отличных от живого мозга, например в современных вычислительных машинах. Только новые данные, выходящие за пределы исходных положений этой главы, могут помочь нам в дальнейшем установлении соответствий.

Глава 11

СИСТЕМА С ПОЛНОЙ ВЗАИМОСВЯЗЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ

11.1. Гомеостат, конечно, во многих отношениях резко отличается от головного мозга; одно из самых очевидных различий состоит в том, что если мозг имеет огромное число составных частей, то в гомеостате их, по существу, всего четыре. Это различие не означает, что теория ультрастабильной системы совершенно неприменима к головному мозгу, так как многое в этой теории верно независимо от числа частей, которое здесь просто безразлично. Тем не менее есть опасность, что мы, потратив так много времени на изучение системы из четырех частей, усвоим себе некий комплекс образов или комплекс рабочих гипотез, который окажется совершенно несоразмерным, если рассматривать его как инструмент для мысленного подхода к изучению реального мозга. Поэтому нам нужно специально рассмотреть особенности ультрастабильной системы, состоящей из очень большого числа частей. Мы увидим, что одна трудность становится здесь доминирующей; о ней мы и будем говорить во всей остальной части книги, так как это главная проблема, с которой связана адаптация больших систем.

Время, необходимое для адаптации

11.2. Представим себе, что гомеостат состоял бы из тысячи блоков. Это число очень мало в сравнении с числом элементов головного мозга, но для нашей цели оно достаточно. Такая система будет иметь тысячу реле

(F на фиг. 35); предположим, что все они, кроме ста, закорочены, так что в системе остается только сто существенных переменных. Возможно, что это число того же порядка, что и число существенных переменных в живом организме.

Поскольку эти переменные жизненно важны, адаптация должна означать, что *все* они удерживаются в надлежащих пределах. Попробуем сделать грубый предварительный расчет. Чтобы еще больше упростить дело, предположим, что при изменении ступенчатых функций каждая существенная переменная имеет одинаковые шансы войти в свои пределы и выйти из них и что эти шансы для разных переменных независимы. (Согласно нашей основной стратегии, нужно рассмотреть случай их независимости, так как это центральный случай.) Зададим себе вопрос: *сколько проб* в среднем потребуется для адаптации?

Для каждой переменной вероятность остаться в своих пределах равна 1/2. При каждой пробе вероятность того, что все 100 переменных не выйдут из пределов, составит $(1/2)^{100}$, и поэтому среднее число проб должно быть равно 2^{100} (см. § 22.7). Сколько это займет времени, скажем, при 1 пробе в секунду? Ответ: около 10^{22} лет — время невообразимо огромное по сравнению с любым астрономическим периодом! Практически это все равно что никогда, и мы, таким образом, подошли к нашей главной проблеме: мозг, хотя он и состоит из множества частей, *действительно* адаптируется в сравнительно короткое время, а гомеостат, содержащий 1000 блоков, т. е. неизмеримо меньшее число частей, на это не способен. В чем же дело?

Вряд ли возможно, что мозг не использует основного принципа ультрастабильности, так как аргументы, приведенные в § 7.8, показывают, что *любая* система, части которой подчинены обычным законам причины и следствия, должна использовать этот метод. Точно так же нет оснований предполагать, что описание числа необходимых проб функцией 2^N, где N — число существенных переменных, совершенно ошибочно, хотя оно

и несколько неточно: другие способы рассуждения (см. ниже) приводят к величине того же порядка, явно слишком большой, чтобы ее можно было совместить с известными фактами. Едва ли можно сомневаться в том, что гомеостат, состоящий из 1000 блоков, по медленности своей адаптации совершенно несравним с мозгом млекопитающего. В чем же тогда эта система существенно несходна с системой, состоящей из мозга и окружающей среды?

11.3. В предыдущем параграфе мы, в сущности, игнорировали динамическую природу мозга и среды, так как расчет был основан на прямой связи между ступенчатыми механизмами и существенными переменными, а то, что соединяет их, не учитывалось. Теперь зададим себе тот же вопрос, игнорируя существенные переменные, но учитывая динамические системы среды и реагирующей части (см. фиг. 22). Рассмотрим два типовых случая (согласно § 2.17).

В первом случае система, подобно гомеостату, имеет только одно состояние равновесия, которое может быть устойчивым или неустойчивым. В этом случае нестабильные (неустойчивые) поля для организма бесполезны, так как они не сохраняются; лишь стабильные (устойчивые) поля могут долгое время приносить пользу, так как только они сохраняются. Теперь поставим такой вопрос: если бы гомеостат состоял из 1000 блоков, сколько потребовалось бы проб для нахождения *стабильного* поля? Хотя ответ еще не известен, так как математические проблемы не решены, есть данные (§ 20.10), указывающие на то, что в некоторых типичных случаях получится число порядка 2^N, где N — число переменных. По-видимому, нет сомнений в том, что если бы гомеостат состоял из 1000 блоков, то практически каждое поле было бы нестабильным и шансы на появление одного стабильного поля на протяжении жизни практически равнялись бы нулю. Таким образом, мы приходим, в сущности, к тому же выводу, что и раньше.

Во втором случае, который мы рассмотрим, переход системы от одного состояния к другому происходит

случайным образом, так что любое состояние может с равной вероятностью следовать за любым другим. Такие системы исследовали Рубин и Ситгревс. Они, в частности, нашли, что модальная длина линии поведения равна $\sqrt{n}$, где n — число состояний. Если же целое состоит из N частей, каждая из которых может находиться в любом из σ^N состояний, то целое может находиться в любом из σ состояний. Это и будет n; таким образом, модальная длина линии поведения составит $\sqrt{\sigma^N}$, что можно написать в виде $(\sqrt{\sigma})^N$. И здесь, подставив какие-либо правдоподобные числа, мы найдем, что при $N=1000$ длина линии поведения такова, что для достижения системой *какого-то* равновесия понадобится время, несравненно более долгое, чем то, которое обычно требуется живому мозгу.

11.4. Все три функции, полученные в результате вычислений, проведенных тремя разными способами, принадлежат к экспоненциальному типу — число проб пропорционально какому-то числу, возведенному в *степень*, показатель которой равен числу существенных переменных или частей системы. Экспоненциальным функциям присуща одна особенность: они возрастают с обманчивой медлительностью, когда показатель еще невелик, а затем, по мере увеличения показателя, начинают расти с головокружительной быстротой. Например, пока гомеостат состоит всего из нескольких блоков, число необходимых проб невелико. Однако умеренное увеличение числа блоков — до 1000 — уже ведет к тому, что число проб взлетает до величин, в сравнении с которыми даже астрономические числа кажутся незначительными. Если число проб выражается экспоненциальной функцией, то никаким способом нельзя снизить его до «обычного» уровня.

11.5. Процессы, рассмотренные в двух последних параграфах, требовали так несоразмерно много времени потому, что частичные успехи ничего не давали. Чтобы увидеть всю важность этого факта, проиллюстрируем его простым расчетом.

Предположим, что для каждого из N событий вероятность успеха равна p и что вероятности независимы. Примером могли бы служить N колес с буквами A и B на ободе, где буквы A занимали бы p-ю долю окружности, а B — остальную ее часть. Все колеса приводят во вращение и дают им остановиться; остановка колеса на букве A считается за «успех». Сравним три способа сложения этих частных успехов в Большой Успех[1], который мы считаем достигнутым только тогда, когда все колеса остановятся на букве A.

Случай 1. Приводятся во вращение все N колес; если все они дадут букву A, регистрируется Успех и пробы заканчиваются; в других случаях колеса снова приводятся во вращение — и так далее, пока «все A» не появятся сразу.

Случай 2. Вращается 1-е колесо; если оно остановится на A, оно остается в этом положении; в противном случае его вращают снова. Когда оно, наконец, остановится на A, таким же образом вращают 2-е колесо и т. д. по порядку все N колес, пока все не покажут A.

Случай 3. Приводят во вращение все N колес; те, которые покажут A, остаются в этом положении, а те, которые покажут B, вращаются снова. При дальнейших появлениях A соответствующие колеса также остаются в покое. Таким образом, число вращаемых колес все уменьшается, пока все они не будут стоять на A.

Пусть каждое вращение (независимо от числа вращаемых колес) считается одной пробой. Сколько проб в среднем потребуется в каждом из трех случаев?

В 1-м случае потребуется $(1/p)^N$ проб (см. § 11.2); во 2-м в среднем $1/p$ для первого колеса, затем $1/p$ для второго и т. д., так что для всех колес понадобится N/p проб. Число проб в 3-м случае рассчитать трудно, но оно будет равно среднему числу проб в самой длин-

[1] Так как нам придется рассматривать различные «сложения» малых событий в крупные, я буду соответственно обозначать их, как это принято во «Введении в кибернетику», § 13/8, строчной и прописной буквами в начале слова.

ной серии из N серий проб с одним колесом и может быть найдено из распределения длин таких серий; оно будет несколько больше $1/p$.

Эти расчеты интересны не своей количественной точностью, а тем, что при больших значениях N они дают величины совершенно разного порядка. Предположим, например, что p равно 1/2, что пробы повторяются каждую секунду и что N равно 1000. Тогда T_1, T_2 и T_3 — средние значения времени достижения Успеха в 1-м, 2-м и 3-м случаях соответственно — равны:

$$T_1 = 2^{1000} \text{ сек},$$

и

$$T_2 = \frac{1000}{2} \text{ сек}$$

$$T_3 = \text{немного больше } {}^1/_2 \text{ сек}.$$

Если перевести эти величины в обычные меры времени, то T_1 составит около 10^{293} лет, T_2 — около 8 *мин*, а T_3 — несколько секунд. Таким образом, если в 1-м случае (необходимость одновременного появления всех A) достижение Успеха практически невозможно, то во 2-м и 3-м случаях оно не составляет трудности.

Конечный вывод, заключающийся в том, что 1-й случай весьма отличен от 2-го и 3-го, по существу, не зависит от выбранных величин p и N. Он лишь иллюстрирует то общее правило, что экспоненциальная функция растет гораздо быстрее, чем линейная. Если, читатель пожелает испробовать другие числа, он, вероятно, получит результаты более или менее сходного характера.

11.6. Из сравнения трех рассмотренных нами случаев легко понять, почему во 2-м и 3-м случаях Успех достигается гораздо быстрее, чем в 1-м: здесь могут быть использованы частичные успехи, что в 1-м случае невозможно. Предположим, например, что в 1-м случае какая-то проба дала 999 A и 1 B. Это очень близко к полному Успеху и тем не менее равносильно полной неудаче, так как все A должны вновь идти «в переплавку». В 3-м же случае оставалось бы вращать только одно колесо, а во 2-м, быть может, получилась бы

порядочная серия сплошных A с левого конца ряда и, таким образом, была бы извлечена известная польза.

Итак, приведенные примеры показывают, что время сильно — чрезвычайно сильно — сокращается, когда конечный Успех может быть достигнут отдельными этапами, на которых частичные успехи могут сохраняться и *аккумулироваться*.

11.7. Найти реальный пример, в котором одна система демонстрировала бы все три подхода к достижению Успеха, весьма трудно; лишь немногие системы имеют столь гибкую конструкцию. Однако эти различия можно показать на примерах, построенных с помощью теории вероятностей. Предположим, что мы, стоя на улице, отмечаем последнюю цифру номера каждого проходящего автомобиля и решаем, что мы хотим из всех проходящих машин отметить десять, у которых последние цифры номеров образуют последовательность 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Если нам непременно нужно, чтобы эти 10 машин прошли подряд одна за другой, то нам придется ждать, пока не пройдет около 10 000 000 000 автомобилей; практически это невозможно. Но если мы удовлетворимся тем, что сначала увидим цифру 0, затем (через несколько машин) цифру 1 и т. д., пока не встретим 9 (как во 2-м случае), то число машин, которые должны будут пройти, составит около 50, что делает «Успех» легко достижимым.

11.8. Хорошо известным физическим примером, иллюстрирующим это различие, служит кристаллизация твердого тела из раствора. Молекулы растворенного вещества движутся беспорядочно, так что для каждого данного промежутка времени существует определенная вероятность того, что скорость и положение данной молекулы позволяют ей присоединиться к кристаллу. Но мельчайший из видимых кристаллов содержит миллиарды молекул, и если бы такой кристалл мог образоваться только тогда, когда все его будущие молекулы случайно приобрели бы надлежащее взаимное расположение и двигались бы в надлежащем направлении (1-й случай), то кристаллизация никогда не могла бы

произойти: это было бы слишком невероятно. Но в действительности кристаллизация может происходить последовательно (2-й случай): если кристалл уже начал формироваться, то любая отдельная молекула, положение и направление движения которой случайно окажутся подходящими, может присоединиться к нему независимо от положения и движений остальных молекул в растворе. Таким образом, кристаллизация может совершаться по этапам, и необходимое для нее время сравнимо скорее с T_2, чем с T_1. Итак, мы можем сделать следующий вывод. *Сложное событие, невозможное в том случае, если входящие в него элементарные события должны совершиться одновременно, легко может произойти, если они могут наступать последовательно или независимо друг от друга.*

11.9. Теперь нам становится ясно, в чем отличие гомеостата, состоящего из 1000 блоков, для адаптации которого требуется столь несоразмерно долгое время, от живого организма, который обычно адаптируется за какую-то долю своей индивидуальной жизни. Конечно, организм достигает полной адаптации, свойственной ему в зрелом возрасте, не в результате того, что производит одну совершенно бесполезную пробу за другой, пока внезапно не получится сразу все, что нужно! Напротив, он больше следует правилам 2-го и 3-го случаев — достигает частичных успехов и *закрепляет* их, одновременно продолжая улучшать то, что еще не отвечает требованиям.

Однако прежде чем перейти к рассмотрению последних случаев, мы должны заметить, что гомеостат из 1000 блоков не вполне атипичен, так как *действительно* встречаются условия (хотя они и редки), в которых все частичные успехи должны быть достигнуты одновременно, иначе они вовсе не идут в счет. Известно, что такие случаи представляют для живого организма большую трудность. Возьмем простой случай — форели нужно поймать муху над поверхностью воды; для этого рыба должна высунуться из воды в надлежащем месте и сомкнуть челюсти в надлежащий момент; здесь две

переменные существенны в том смысле, что для успеха обе величины должны находиться в надлежащих пределах; «ошибка» в той или другой величине означает полную неудачу.

Примером *par excellence* может служить тот случай, когда взломщик, «гомеостатически» пытающийся добыть себе хлеб насущный путем грабежа, встречается с тем особым элементом среды, который называют секретным замком. Конечно, эта вещь рассчитана именно на то, чтобы создать для вора как можно большую трудность; и специфическая трудность состоит здесь как раз в том, что частичные успехи — отыскание, скажем, шести верных букв из семи — ничего не дают, так что здесь невозможно постепенное приближение к цели. Таким образом, встречаясь с условиями, не позволяющими использовать частичную адаптацию, человек и гомеостат одинаково терпят неудачу.

Кумулятивная адаптация

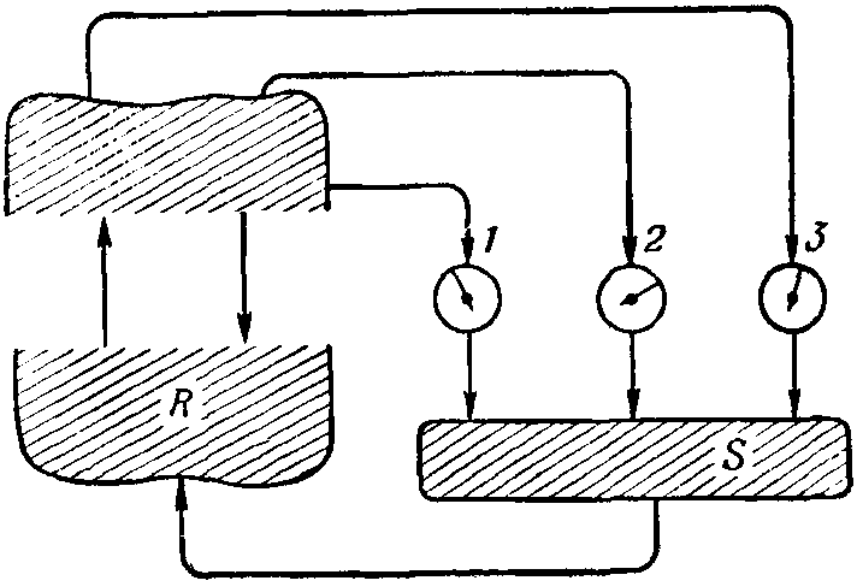
11.10. Однако в земных условиях подобные проблемы встречаются не часто. Обычно организм имеет много существенных переменных и в то же время довольно быстро достигает адаптации, необходимой для удержания их всех в нормальных пределах. Посмотрим, к какому выводу можно прийти, исходя из этих на первый взгляд противоречащих друг другу фактов (следуя в основном методу, изложенному в § 4.12).

Чтобы показать суть дела, достаточно совсем простого примера. Представим себе, что организм имеет три существенные переменные (*1*, *2* и *3*), каждая из которых подвержена влиянию среды и способна наложить вето на стабильность ступенчатых механизмов (фиг. 45).

Предположим, что организм достиг адаптации в отношении существенных переменных *1* и *2*. (Точнее: возмущение среды встречается с таким набором значений ступенчатых функций S, что, реагируя на это

возмущение, существенные переменные 1 и 2 никогда не выходят из надлежащих границ.) Однако реакция продолжает выводить существенную переменную 3 из ее пределов.

Примем теперь за данное, что в системе будет совершаться процесс, подобный описанному в § 7.23, и что после его окончания ступенчатые функции перейдут к новым значениям — таким, что теперь существенная переменная *3* удерживается в своих пределах, а две другие *продолжают реагировать по-прежнему*



Фиг. 45.

(это необходимо, поскольку мы хотим предполагать, что однажды приобретенные адаптации сохраняются).

Посмотрим, что из этого следует. Пусть S_s — совокупность тех ступенчатых функций, которые изменили свои значения после проб, связанных с адаптацией переменной *3* (такие механизмы должны существовать, иначе изменение реакции *3* на воздействие среды было бы следствием без причины). Применим теперь наш основной рабочий прием (§ 4.12): из того, что ступенчатые функции S_s изменили значение, а формы поведения, связанные с адаптацией переменных *1* и *2*, не изменились, следует, что не может существовать эффективного канала связи от ступенчатых механизмов S_s (в S) через R к факторам среды, влияющим на переменные *1* и *2* (хотя это и не отражено на фиг. 45).

Далее, пусть M_{12} обозначает все те части в R и в среде, которые играют роль в определении конечного влияния на переменные *1* и *2*. Пусть M_3 аналогичным образом обозначает части канала от S_3 через R и среду к переменной *3*. (О связи между M_{12} и M_3 никаких предположений не делается.) Канал M_3 не может быть неэффективным (иначе механизмы S_3 не имели бы путей для воздействия на переменную *3* и адаптация ее не могла бы произойти). Точно так же и канал M_{12} не может быть неэффективным. Наконец, сделанный ранее вывод об отсутствии канала от S_2 (через R и среду) к переменной *1* или *2* означает, что *не существует переменных, общих для* M_{12} *и* M_3, *и нет никакого канала от* M_3 *к* M_{12} (ибо иначе изменения в S_3 сказались бы на переменных *1* и *2*, что противоречит гипотезе).

Таким образом, мы показали, что для накопления адаптаций необходимо, чтобы *не существовало* каналов от каких-то ступенчатых механизмов (например, S_3) к каким-то переменным (например, M_{12}), а также от каких-то переменных (например, M_3) к другим переменным (например, M_{12}). Следовательно, адаптации могут накапливаться только в том случае, если в системе нет полной взаимосвязи элементов. Мы здесь не можем ограничиться утверждением, которым столь часто довольствуются психологи, считающие, что все можно было бы объяснить наличием достаточного количества перекрестных связей.

В этом все дело. Для того чтобы метод ультрастабильности приводил к успеху в достаточно короткое время, необходимо, чтобы частичные успехи закреплялись. А для этого необходимо, чтобы определенные части системы *не* сообщались с определенными другими частями или не влияли на них.

11.11. Теперь нам ясно, в чем гомеостат не мог служить верной моделью. С самого начала этой книги (с § 1.7) мы рассматривали мозг и среду как «сильно связанные» (как внутри себя, так и между собой) системы. Гомеостат был построен так, что каждый его блок фактически взаимодействовал с каждым из остальных блоков.

Таким путем мы разработали теорию полностью интегрированной системы.

Все время имея дело с системами, в которых мы предполагали такое богатство связей, какое читатель пожелал бы представить себе, мы не имели возможности много говорить об интеграции и рассматривать механизм, который фактически действовал в отдельных частях. Реагирующие части и формы среды, которые мы до сих пор обсуждали, были интегрированы до крайней степени.

11.12. Однако теперь нам ясно, что в этом направлении можно зайти слишком далеко. Уже гомеостат заходит чересчур далеко; он слишком сильно интегрирован, не может накоплять адаптации и поэтому адаптируется неизмеримо медленнее, чем головной мозг. Теперь мы должны рассмотреть систему, сходную с гомеостатом своей ультрастабильностью, но обладающую меньшим числом связей между частями. Какова же должна быть ее насыщенность внутренними связями, чтобы она была сходна с нервной системой?

Представления о числе внутренних связей в нервной системе — о степени ее «целостности» — до сих пор были весьма различными и доходили до обеих крайностей. «Рефлексологи», начиная с Белла, признавали, что нервную систему при некоторых видах ее активности можно рассматривать как совокупность независимых друг от друга частей. Они указывали, например, на то, что зрачковый рефлекс на свет и коленный рефлекс протекают в обычной форме независимо от того, вызывают ли их одновременно или по отдельности. Кашлевой рефлекс происходит одинаково независимо от того, стоит человек или сидит. Выработка новой условной реакции может почти не повлиять на реакцию, выработанную раньше. С другой стороны, школа гештальт-психологии признавала, что многие формы активности нервной системы характеризуются целостностью, при которой то, что происходит в одном ее участке, влияет на происходящее в других участках. Иногда эти две группы фактов считали непримиримыми друг с другом.

Однако Шеррингтон в 1906 г. показал на примере спинномозговых рефлексов, что нервная система не разделена на постоянно разобщенные части и в то же время не настолько целостна, чтобы каждое событие в ней всегда влияло на все остальные. Он обнаружил более многообразную и более сложную картину — картину постоянно меняющихся взаимодействий и взаимозависимостей. «Например, путем раздражения хвоста у спинальной собаки можно вызвать слабый рефлекс, не нарушая рефлекса ходьбы...» «Два рефлекса могут быть нейтральными по отношению друг к другу, если оба они слабы, но могут взаимодействовать, когда один из них или оба сильны...» «Но, показав, что рефлексы могут быть нейтральны по отношению друг к другу у спинальной собаки, мы еще не доказываем того, что они будут нейтральными у животного с полностью интактной, неповрежденной нервной системой». Разделение на многочисленные части и объединение в одно целое — это просто две крайние точки на шкале «степени связанности».

Интересуясь главным образом происхождением адаптации и координации, я до сих пор был склонен больше подчеркивать связанность частей в нервной системе. Однако не следует упускать из виду, что адаптация может требовать не только взаимодействий, но и независимости. Например, человек, обучающийся вождению автомобиля и только что научившийся вести машину прямо посередине дороги, может заметить, что при всякой попытке сменить передачу машину начинает сносить в сторону. Позже, когда он приобретет известный навык, смена передачи не будет оказывать никакого влияния на направление движения автомобиля. Таким образом, адаптация требует не только интеграции связанных между собой действий, но и независимости действий, не имеющих отношения друг к другу.

11.13. Поэтому мы в дальнейшем не будем придерживаться предположения, что все части системы тесно связаны между собой. Эта свобода позволяет вводить различные видоизменения, которые мы до сих пор

специально не рассматривали и которые создают новые формы ультрастабильной системы. Эти формы по-прежнему ультрастабильны, так как они соответствуют определению (в котором нет прямых указаний на число связей), но их адаптация не будет столь безнадежно медленной, как адаптация простой формы, описанной в § 11.2. Они достигают этого благодаря частичному, гибкому, вре́менному «выключению» зависимостей внутри целого, так что целое становится комплексом подсистем, внутри которых связи сильно развиты, но *между* которыми они более ограниченны. Изучение таких систем займет всю остальную часть этой книги.

Глава 12

ВРЕ́МЕННАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ

12.1. Мы не раз пользовались, без всякого определения, понятием «независимости» одной переменной или системы от другой. Было сказано, что система, определяемая состоянием, должна быть «надлежащим образом изолирована»; некоторые параметры описывались в § 6.2 как «неэффективные». До сих пор метод, описанный в § 4.12, был достаточен, но, поскольку сейчас мы собираемся исследовать системы, элементы которых ни полностью связаны, ни полностью разобщены, необходим более строгий метод.

Понятие «независимости» двух динамических систем могло бы на первый взгляд показаться простым: разве не достаточно отсутствия материальной связи? Примеры тотчас же покажут, что этот критерий ненадежен. Две части электрической системы могут быть механически прочно связаны, но если их соединяет изолятор, то функционально они будут независимыми. Два рефлекторных механизма в спинном мозгу могут быть сложным образом переплетены и все-таки оставаться функционально независимыми.

Вместе с тем одна система может не иметь никакой механической связи с другой и все же заметно подвергаться ее влиянию: таков, например, радиоприемник по отношению к передатчику. Даже наибольшее разобщение, которое можно себе представить,— расстояние между нашей планетой и отдаленнейшими туманностями — не служит гарантией функциональной изоляции: свет, испускаемый этими туманностями, все еще способен возбуждать споры среди земных астрономов.

Таким образом, критерий наличия или отсутствия физической связи бесполезен.

12.2. Нельзя ли связать критерий независимости с передачей энергии или материи от одной переменной (или системы) к другой? Это предположение правдоподобно, но наблюдения над простыми механизмами показывают, что дело не так просто. Когда мой палец ударяет по клавише пишущей машинки, движение его определяет движение литеры шрифта; в то же время палец доставляет энергию, необходимую для движения литеры. В данном случае схема

$$\boxed{A} \longrightarrow \boxed{B}$$

могла бы означать как то, что энергия, измеряемая в эргах, передается от A к B, так и то, что поведение B определяется поведением A (или может быть предсказано исходя из поведения A). Если, однако, B не испытывает недостатка в энергии, передача энергии от A к B становится несущественной для вопроса о влиянии одной переменной на другую. В самом деле, нетрудно сконструировать механизм, в котором как энергия, так и материя переходит от B к A и все-таки A влияет на B. Предположим, например, что B содержит компрессор, нагнетающий воздух с постоянной силой в цилиндр и создающий в нем давление, отражаемое на шкале прибора. От цилиндра идет трубка к A, где находится кран, позволяющий выпускать воздух наружу и тем самым регулировать давление в цилиндре. Предположим теперь, что мимо проходит человек; он ничего не знает о внутреннем механизме, но хочет исследовать связь между двумя переменными — положением крана (A) и показанием на шкале прибора (B). Путем прямого испытания он скоро устанавливает, что A влияет на B, а B не оказывает никакого действия на A. Таким образом, направление действия не обязательно связано с направле-

нием потока энергии или материи, когда система такова, что обе части получают энергию в достаточном количестве.

Независимость

12.3. Критерий независимости может быть в действительности основан на результатах первичных операций (§ 2.10), без всякой ссылки на другие понятия и на знание системы, полученное из каких-либо других источников.

В качестве основного определения будет просто сформулировано то, что использовалось интуитивно в § 4.12. Для того чтобы проверить, влияет ли переменная X на переменную Y, наблюдатель приводит систему в какое-то состояние, ожидает, пока произойдет переход, и отмечает последующую величину Y. (Новая величина X не имеет значения.) Затем он приводит систему в состояние, отличающееся от первого только величиной X (в частности, переменная Y тоже должна быть возвращена в первоначальное состояние). Потом он снова наблюдает переход и снова отмечает конечную величину Y. (Таким образом, он получает два перехода Y из двух состояний, различающихся только величиной X.) Если эти величины Y одинаковы, то Y считают **независимым** от X — при данных исходных состояниях и других условиях.

Под **зависимостью** мы будем понимать просто «отсутствие независимости».

Этот рабочий прием, или тест, позволяет обнаружить, так сказать, «атом» независимости. Необходимы два перехода: при меньшем их числе понятие независимости лишено смысла.

12.4. В общем случае результат этого теста при одной паре начальных состояний не накладывает никаких ограничений на результаты, которые можно получить при других парах. Нельзя исключить возможность того, что он даст результаты, произвольно варьирующие в зависимости от исследуемой пары. Однако часто

бывает так, что при некоторой данной величине всех других переменных или параметров Z, W... переменная Y независима от X при *всех* парах начальных состояний, различающихся только величиной X. В этом случае для данного поля и при данных величинах других переменных и параметров переменная Y *независима* от X в более широком смысле. Если только поле и начальные величины Y, Z, W и т. д. не изменяются, начальная величина X не влияет на переход Y. В этом случае Y не зависит от X на протяжении области (в фазовом пространстве), которая представлена линией, параллельной оси X, «не зависит» в том смысле, что всякий раз, когда репрезентативная точка, движущаяся по некоторой линии поведения, выходит из этой области, переход Y будет одним и тем же.

Иногда может случиться, что Y не зависит от X не только при всех величинах X, но и при всех величинах других переменных и параметров — Z, W и т. д. В случае, рассмотренном в предыдущем параграфе, какое-то изменение величины Z могло бы таким образом изменить поле или область, что Y перестал бы быть независимым от X. В настоящем случае переход Y (от одной и той же величины) всегда одинаков, каковы бы ни были начальные величины X, Z, W и т. д.: величина Y **независима** от X при любых условиях.

Из этого видно, что две переменные могут быть «независимы» в различной степени: в двух точках, в пределах линии, в пределах области, во всем фазовом пространстве, во *множестве* полей. Поэтому слово «независимый» может означать самую различную степень независимости. Приведенные выше определения не имеют целью ответить на вопрос (сомнительной значимости): «*что такое* независимость *на самом деле*?» Они должны просто показать, как нужно пользоваться этим словом, чтобы не вызвать недоразумений. Ясно, что это слово часто требует дополнительного уточнения (например, «Y независим от X в пределах данного поля» или «во всех полях»); это уточнение может быть прямо сформулировано или может вытекать из контекста.

Таким образом, слово «независимый» сходно со словом «стабильный»: оба они часто бывают полезны тем, что позволяют быстро и легко передать информацию о системе, *когда система достаточно проста* и когда известно, что они будут правильно поняты. Но если система не проста, нужно всегда быть готовым сообщить дополнительные подробности или даже вернуться к описанию самих переходов; такой способ всегда надежен, так как дает полную информацию.

12.5. Итак, есть различные степени независимости, так что Y может быть независимым от X в пределах небольшого участка поля, но стать зависимым при расширении того же участка; из этого следует, что одна система может дать множество схем непосредственных воздействий — столько, сколько есть областей и условий данной независимости. Это следствие мало приятно для нас, но мы должны с ним считаться. (К счастью, интересующие нас формы независимости нередко дают в основном одинаковую схему, так что часто одной схемой могут быть представлены все существенные аспекты независимости.)

12.6. До сих пор мы рассматривали независимость Y от X. Какова бы она ни была, это в общем случае никак не определяет зависимости или независимости X от Y. Если X не зависит от Y, но Y зависит от X, то говорят, что X **доминирует** над Y.

12.7. Данное до сих пор определение касается независимости между двумя переменными. Но бывает так, что каждая переменная в системе A независима от каждой переменной в системе B. Тогда мы говорим, что система A **независима** от системы B.

И здесь такая независимость в общем случае не ограничивает возможностей зависимости или независимости B от A; A может **доминировать** над B.

12.8. Для того чтобы проиллюстрировать применение этого определения и показать, что оно согласуется с повседневным опытом, приведем несколько примеров.

Если бактериолог хочет выяснить, влияет ли какое-либо вещество на рост микроорганизма, он приготов-

ляет две пробирки с питательной средой, содержащей это вещество в разных концентрациях (X), но идентичной в отношении всех других компонентов; затем он высевает в пробирки равное количество клеток и наблюдает, как изменяется их число (Y) с течением времени. Потом он сравнивает числа, найденные после двух начальных состояний, различавшихся только концентрацией исследуемого вещества.

Для того чтобы проверить, зависит ли система, определяемая состоянием, от какого-либо параметра, т. е. «эффективен» ли этот параметр, наблюдатель отмечает поведение системы в двух случаях, когда параметр имеет разные величины. Например, чтобы выяснить, действительно ли температура в термостате зависит от положения регулятора, он устанавливает регулятор в каком-то положении, убеждается в том, что температура имеет свою обычную величину, и отмечает последующее поведение температуры; затем он возвращает температуру к ее предыдущей величине, изменяет положение регулятора и снова наблюдает. Изменение поведения указывает на эффективность регулятора.

Наконец, приведем пример из области поведения животных. Паркер исследовал, зависит ли поведение щупальца актинии от того, соединено ли оно с телом.

> «Когда на щупальца актинии помещали мелкие кусочки мяса, эти органы обвивались вокруг кусков пищи и, сгибаясь в надлежащем направлении, подносили их ко рту».

(Паркер установил, что это поведение регулярно и что систему «положение щупалец — положение пищи» приблизительно можно считать системой, определяемой состоянием. Он описал линию поведения после состояния «щупальце вытянуто, пища лежит на щупальце».)

> «Если теперь вытянутое щупальце спокойной, расправившей свое тело актинии ухватить у основания щипцами, отрезать и держать в таком положении, чтобы можно было ясно представлять себе его первоначальное положение относительно

всего тела животного, то окажется, что оно попрежнему реагирует на пищу при соприкосновении с ней и в конце концов сгибается в ту сторону, где раньше находился рот».

(Паркер описал теперь линию поведения после второго начального состояния, идентичного первому во всем, кроме того, что параметр «соединение с телом» имел иную величину. Он установил, что обе формы поведения переменной «положение щупальца» тождественны.) Паркер делает вывод, что система щупальца в этом отношении независима от системы тела:

«Таким образом, внутри щупальца имеется полный нервно-мышечный механизм, обеспечивающий его собственные реакции».

Итак, наше определение согласуется с обычными представлениями. Хотя и громоздкое в простых случаях, оно имеет то преимущество, что в сложных случаях позволяет проверить независимость переменных в системе с помощью одних лишь первичных операций и получить ясный и точный ответ.

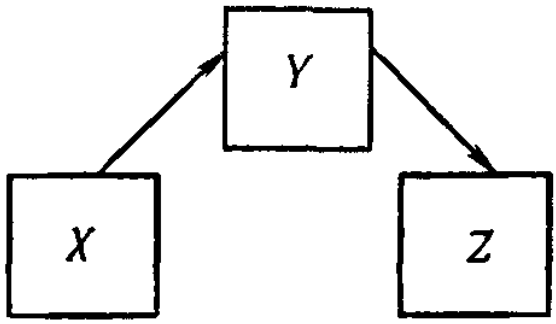
12.9. При этом определении «независимость» зависит от того, как система ведет себя в единицу времени (во время одной «ступени», если изменение имеет характер ступенчатой функции, или в бесконечно малый промежуток времени, если изменение происходит непрерывно). Определенные таким образом зависимости между всеми парами переменных дают, согласно определению в § 4.12, схему *непосредственных* воздействий.

Вообще эта схема не ограничена какими-либо формами: при достаточном разнообразии машин могут существовать все геометрически возможные формы. Такая свобода, однако, возможна не всегда, если мы рассматриваем связь между двумя переменными на протяжении значительного времени. Предположим, например, что схема непосредственных воздействий имеет вид

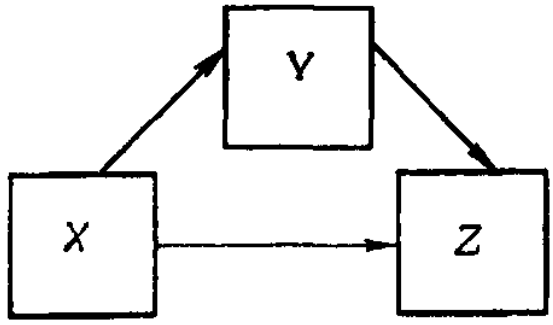
$$\boxed{X} \longrightarrow \boxed{Y} \longrightarrow \boxed{Z}$$

X может не оказывать никакого непосредственного действия на Z, но на протяжении двух «ступеней» связь этих переменных не свободна, так как две разные начальные величины X приведут, одной ступенью позже, к двум различным величинам Y, а эти две различные величины Y приведут (поскольку Z зависит от Y) к двум разным величинам Z. Таким образом, после двух ступеней даже и при отсутствии непосредственного воздействия X на Z изменения X приведут к изменениям Z: значит, X все-таки действует на Z, хотя и с запозданием.

Таким образом, возможна зависимость иного рода, существующая в том случае, если Z изменяется когда-либо в результате изменений X. Эти отношения можно представить схемой конечных (отдаленных) воздействий. Ее нужно ясно отличать от схемы непосредственных воздействий, из которой она может быть получена. Для этого к схеме непосредственных воздействий добавляют новые стрелки, согласно следующему правилу: если любые две стрелки соединены последовательно:



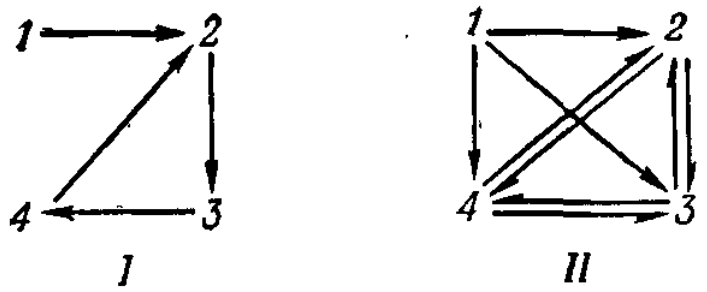
то добавляют третью стрелку, идущую от начала первой к концу второй:



Так поступают до тех пор, пока не будут введены все возможные новые стрелки. Например, из схемы непо-

средственных воздействий I (фиг. 46) будет получена схема конечных воздействий II.

Схема конечных воздействий показывает, какая зависимость существует между переменными в том случае, если время достаточно велико, чтобы проявились

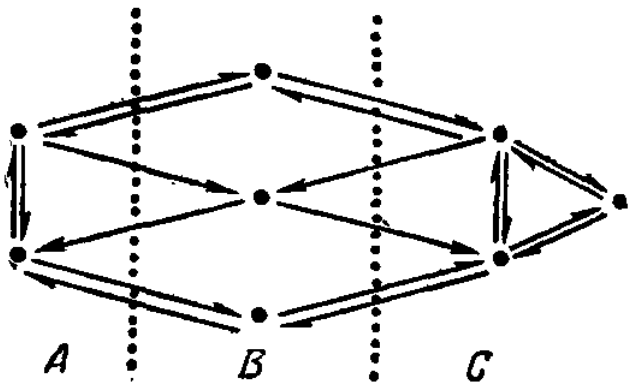


Фиг. 46.

результаты всех воздействий, осуществляемых переменными системы друг на друга. Так, из схемы II мы видим, что переменная I всегда остается независимой от переменных 2, 3 и 4, а три последние все в конечном счете зависят друг от друга.

Следствия постоянства переменных в отдельных подсистемах

12.10. Предположим, что восемь переменных соединены (§ 6.6) таким образом, что они дают схему непосредственных воздействий, показанную на фиг. 47.

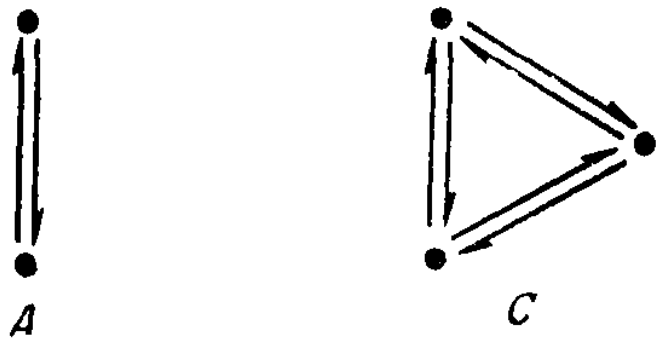


Фиг. 47.

Поставим вопрос: каким должно быть *поведение* трех переменных области B, чтобы A и C были независимы друг от друга (с учетом конечных воздействий) и в то

же время оставались подсистемами, определяемыми состоянием? Иными словами, какое поведение B разделит целое на независимые части со схемой непосредственных воздействий, показанной на фиг. 48?

Этот вопрос имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Многие эксперименты требуют того, чтобы одна система была защищена от воздействий



Фиг. 48.

со стороны других систем. Например, может понадобиться защитить систему с магнитами от влияния земного магнетизма или термическую систему — от влияния изменений температуры воздуха; может потребоваться, чтобы давление, «проталкивающее» кровь через почки, не зависело от изменений частоты пульса.

Первое предположение могло бы состоять в том, что три переменные B должны быть устранены вовсе. Но представление об их устранении не соответствует никакой физической реальности: магнитное поле Земли, температуру воздуха или частоту пульса нельзя «устранить». Можно доказать (§ 22.14), что в действительности верен следующий ответ: *для того чтобы A и C были независимыми подсистемами, определяемыми состоянием, необходимо и достаточно, чтобы переменные B были постоянными функциями.* Другими словами, A и C должны быть разделены *барьером из постоянных величин.*

Из этого следует также, что если переменные B обладают таким свойством, что они иногда флуктуируют, а иногда остаются постоянными (т. е. если они ведут себя как частично постоянные функции), то A и

C будут иногда функционально связанными, а иногда независимыми соответственно поведению B.

12.11. Приведем примеры, показывающие, что эта теорема согласуется с повседневным опытом.

1. Если A (см. фиг. 47) — система, в которой изучают изменения температуры, B — температуры частей контейнера (который служит барьером), а C — температуры различных участков окружающей среды, то для того, чтобы A и C были изолированными системами, определяемыми состоянием, необходимо и достаточно, чтобы величины B поддерживались на постоянном уровне.

2. Две соединенные изолятором системы, в которых течет ток, при медленном изменении тока независимы, так как электрическое сопротивление изолятора постоянно.

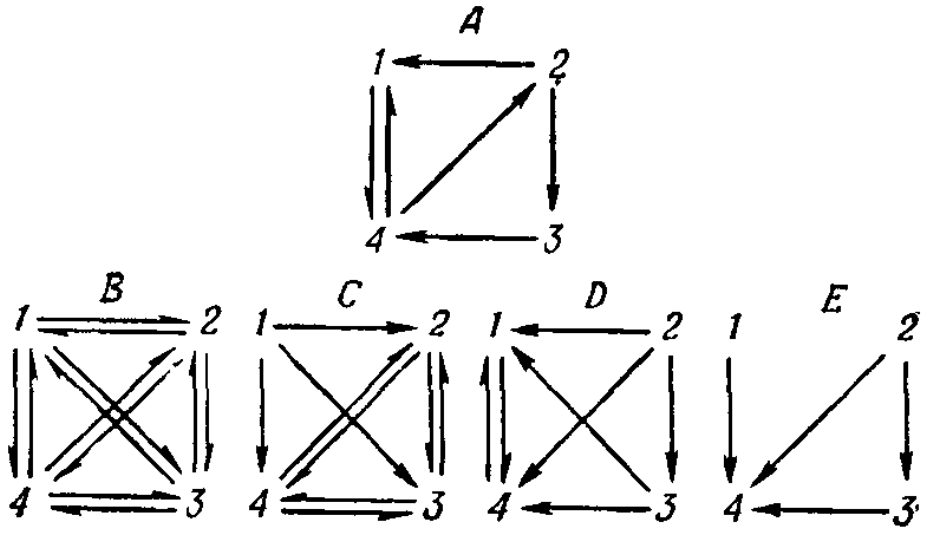
3. Спинномозговые центры могут быть сделаны независимыми от активности головного мозга посредством перерезки спинного мозга; но нарушение физической непрерывности необязательно: участок спинного мозга можно отравить, анестезировать или заморозить — необходимо только то, чтобы он не проводил возбуждения и чтобы в нем не происходило никаких других изменений.

Физическое разобщение, которое, как уже было замечено, не всегда обеспечивает независимость, иногда бывает эффективным потому, что создает промежуточную область постоянства переменных.

12.12. Пример, приведенный на фиг. 47, показал один из способов влияния поведения группы переменных на «независимости» внутри системы; этот способ состоял в смене периодов флуктуации и постоянства. Однако круг возможных способов гораздо шире.

Чтобы показать их многообразие, нам нужно иметь правило, с помощью которого мы могли бы надлежащим образом видоизменять схему конечных воздействий, когда одна или несколько переменных сохраняют постоянную величину. Правило таково: берем схему непосредственных воздействий и, если переменная

V постоянна, снимаем все стрелки, оканчивающиеся острием на V; затем, рассматривая эту видоизмененную схему как схему непосредственных воздействий, дополняем ее до схемы конечных воздействий, пользуясь правилом, сформулированным в § 12.9. Полученная фигура будет схемой конечных воздействий при постоянной величине V. (Можно заметить, что результат

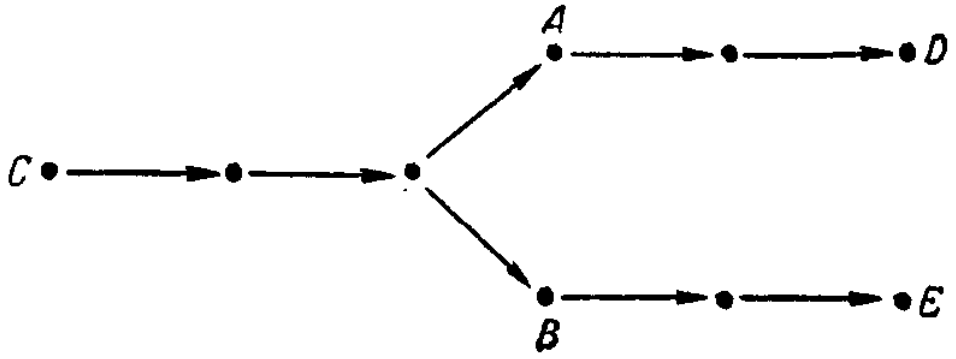


Фиг. 49. Если система четырех переменных имеет схему непосредственных воздействий A и если 1 и 2 — частично постоянные функции, то ее схема конечных воздействий при активности всех переменных будет иметь вид B, а при инактивации переменных 1, 2 или их обеих (1 и 2) — вид C, D или E соответственно.

стабилизации V нельзя вывести из одной лишь первоначальной схемы конечных воздействий.) Таким образом, если A — схема непосредственных воздействий системы 4 переменных (фиг. 49), то схема конечных воздействий будет иметь вид B, C, D или E в зависимости от того, сколько переменных и какие именно постоянны.

Можно видеть, что даже при наличии лишь четырех переменных, только две из которых могут становиться постоянными, картины независимости поразительно разнообразны. Например, на схеме C переменная 1 доминирует над переменной 3, а на схеме D — наоборот. С увеличением числа переменных это разнообразие быстро возрастает.

12.13. Возможность множества различных соединений на телефонной станции обусловлена в первую очередь широким использованием временно постоянных величин. Этот пример напоминает нам о том, что «переключение» — это просто одно из изменений, которые могут возникать при перераспределении постоянных величин. Предположим, что система имеет схему непосредственных воздействий, показанную на фиг. 50. Если воздействие, исходящее от C, идет только по ветви AD, то для того, чтобы ветвь BE была независимой, B должно



Фиг. 50.

иметь постоянную величину. Как достигается это постоянство, безразлично. Когда нужно «переключить» воздействие величины C на ветвь BE, B должно быть освобождено, а A должно стать постоянным. Таким образом, в любой системе с «переключением» должно быть предусмотрено изменяемое распределение постоянных величин. И обратно — *система, переменные которой могут иногда изменяться, а иногда оставаться постоянными, вполне приспособлена для процесса переключения.*

Следствия стабильности отдельных подсистем

12.14. Предыдущие параграфы показали, что для любой системы, в которой должны существовать переменные, временно независимые друг от друга, крайне важно наличие переменных, способных временно стабилизироваться. Поскольку такие переменные будут играть

важнейшую роль в последующем, рассмотрим их подробнее.

Всякая неизменяющаяся подсистема (в том числе состоящая из одной переменной) находится, по определению, в состоянии равновесия. Если окружающие ее условия (параметры) постоянны, то состояние подсистемы, очевидно, является равновесным в соответствующем поле; если она остается неизменной и при изменении ее параметров, то это состояние, очевидно, оказывается равновесным во всех возникающих полях. Таким образом, отсутствие изменений в состоянии подсистемы означает, что это состояние является равновесным; а постоянство при наличии небольших импульсных возмущений означает стабильность.

Верно и обратное: если подсистема находится в состоянии равновесия, то она останется в этом состоянии, т. е. будет сохранять постоянную величину (пока не изменятся ее параметры).

Таким образом, постоянство, равновесие и стабильность тесно связаны между собой.

12.15. Часто ли встречаются такие переменные (или подсистемы)? Ниже (§ 15.2) мы выскажем предположение, что они чрезвычайно распространены, и приведем ряд примеров. Здесь мы можем отметить два типа таких подсистем, заслуживающих особого упоминания.

К одному типу, быть может необычному в реальном мире, но имеющему существенное значение в качестве типовой формы (см. § 2.17), принадлежат подсистемы, для которых существует определенная вероятность p того, что любое их состояние, взятое наудачу, окажется равновесным. Мы будем рассматривать этот тип подсистем в § 13.2. (В пояснение следует заметить, что пространство выборки такой системы может быть дано заданной *совокупностью* подсистем, каждая из которых — машина с входом, так что для нее вполне определено, будет ли данное состояние, при данной входной величине, равновесным или неравновесным.) Этот случай возникает тогда, когда наблюдатель встречается с подсистемой, о которой он знает (или имеет

основание предположить), что это детерминированная машина с входом, но не знает, какая именно подсистема (из их возможной совокупности) находится перед ним; поскольку пространство выборки этой системы задано совокупностью, надлежащим образом подобранной, наблюдатель вправе говорить о вероятности того, что *эта* система, в *этом* состоянии и при *этих* входных величинах будет находиться в состоянии равновесия.

Ко второму типу, несравненно более распространенному, относятся подсистемы с «порогом», у которых *все* состояния равновесны, когда значение некоторого параметра меньше некоторой определенной величины, и все или почти все состояния неравновесны, когда оно превышает эту величину. Хорошо известно, например, что для поднятия лежащего на земле груза требуется сила, превышающая вес груза, или что нерв не ответит потенциалом действия, пока электрическое раздражение (в той или иной форме) не превысит определенного уровня.

Для нас сейчас важно отметить, что порог, поскольку он благоприятствует постоянству, легко может создать необходимые условия для того, чтобы связи между двумя переменными были вре́менными. Например, изменения схемы, изображенной на фиг. 49, легко могли бы быть обусловлены теми ее частями, которые соответствуют подсистемам с «порогом».

12.16. Теперь можно соединить эти выводы с выводами, к которым мы пришли в § 12.10. Если три подсистемы связаны между собой таким образом, что схема непосредственных воздействий имеет вид

$$\boxed{A} \rightleftarrows \boxed{B} \rightleftarrows \boxed{C},$$

и если B находится в состоянии равновесия при всех значениях переменных в A и C, то A и C независимы (при всех условиях). Таким образом, пребывание B в состоянии равновесия *разрывает функциональную связь между A и C.*

Предположим теперь, что состояния подсистемы B равновесны при одних состояниях подсистем A и C и неравновесны при других. Когда A и C при движении всей системы по какой-либо линии поведения проходят через различные состояния, они будут иногда зависимы, иногда независимы (смотря по тому, равновесно или неравновесно в данный момент состояние подсистемы B).

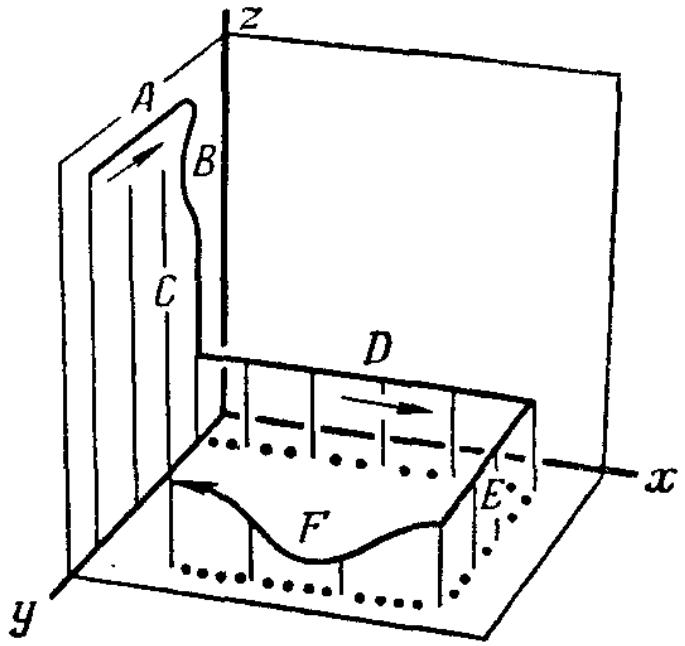
Итак, мы достигли первой цели, поставленной в этой главе,— сделали вполне ясным понятие «вре́менных функциональных связей» при условиях, когда контроль исходит от факторов, лежащих внутри системы, а не осуществляется произвольно извне, и показали, что существование этих связей можно обнаружить в результате первичных операций.

12.17. Эти представления можно распространить на любую систему с каким угодно числом частей и связей. Пусть система состоит из многих частей или подсистем, соединенных как описано в § 6.6; это соединение образует основную схему связей. Если некоторые из переменных или подсистем в течение известного времени не изменяются, то в этот период проходящие через них связи не функционируют и дело обстоит так, как будто они временно физически разорваны.

Если стабилизуется очень большая часть переменных, то степень разобщения может дойти до того, что вся система окажется разделенной на подсистемы, совершенно независимые (временно) друг от друга. Таким образом, целостная, связная система при стабилизации достаточно большой части ее переменных может на время превратиться в совокупность не связанных между собой подсистем. Иными словами, *постоянство некоторых переменных может разделить систему на части*. (Соответствующий пример приведен во «Введении в кибернетику», § 4/20.)

12.18. Поле определяемой состоянием системы, переменные которой часто стабилизируются, обладает лишь той особенностью, что линии поведения часто идут в некотором подпространстве. Например, в период, когда

все переменные, кроме одной, постоянны, линия поведения должна быть прямой, параллельной оси, соответствующей единственной изменяющейся переменной. Если на протяжении какой-то линии поведения изменяются только две переменные, эта линия в фазовом



Фиг. 51. На этапе A активна переменная y, на этапе B — y и z, на этапе C — z, на этапе D — x, на этапе E—y, на этапе F — x и z.

пространстве может быть кривой, но она должна оставаться в плоскости, параллельной двум соответствующим осям, и т. д. Если не изменяется ни одна переменная, линия поведения, естественно, превращается в точку и система оказывается в равновесии. Например, для системы трех переменных возможна была бы линия поведения, показанная на фиг. 51.

В период, предшествующий достижению равновесия, такие переменные будут, конечно, вести себя как частично постоянные функции. Значение их будет раскрываться во всех дальнейших главах книги. Ради удобства мы будем говорить, что частично постоянная функция (описываемая одновременно с той или иной переменной) **активна** или **неактивна**, смотря по тому, изменяется эта переменная или нет.

Глава 13

СИСТЕМА С ОТДЕЛЬНЫМИ СТАБИЛЬНЫМИ ПОДСИСТЕМАМИ

13.1. Выяснив, что́ нужно понимать под системой, имеющей «частичные, флуктуирующие и вре́менные „независимости“ внутри целого», мы можем рассмотреть некоторые особенности поведения системы такого типа.

В словах «система такого типа», конечно, не содержится точного указания на какую-либо определенную систему: мы определили только класс систем. Как могли бы мы достичь точности? Перед нами два пути.

Первый состоит в том, чтобы добавлять новые подробности, пока мы не охарактеризуем систему с полной точностью, так что ее поведение будет детерминированным и однозначно определенным; затем мы можем проследить это поведение во всех деталях. Такое исследование привело бы нас к точным выводам, но дало бы нам гораздо больше подробностей, чем это нужно для остальных глав книги,— столько, что их трудно было бы рассмотреть.

Второй путь состоит в том, чтобы говорить о системах «вообще». Здесь чрезвычайно легко выпустить из рук главное и пуститься в неопределенные рассуждения о том, что происходит «обыкновенно», не обращая внимания на тот факт, что «обыкновенность» тех или иных свойств (скажем, линейности, наличия порога и т. п.) весьма различна в системах, изучаемых социологами, нейрофизиологами и физиками. При обсуждении систем «вообще» строгость и точность *возможны* в том случае, если выполнены два условия: *класс* обсуждаемых систем должен быть точно опреде-

лен, и утверждения, которые мы высказываем, должны точно характеризовать свойства *данного класса*. Иными словами, мы отказываемся от точности в отношении отдельной системы и берем на себя ответственность за точность в отношении класса систем. Этот второй путь и послужит тем методом, которым мы будем в основном пользоваться в остальных главах.

Изменив свою цель, мы будем часто находить, что обсуждение класса систем легче вести на примере какой-то индивидуальной системы, прослеживая ее поведение в деталях; в таких случаях следует уяснить себе, что индивидуальная система важна только в качестве типичного, «представительного» или «случайно выбранного» элемента той совокупности, к которой она принадлежит. Хотя наше обсуждение внешне часто будет сосредоточено на отдельной системе, в действительности оно направлено на свойства всего класса, отдельная же система вводится лишь как средство для достижения цели.

В дальнейшем нам придется много заниматься системами, построенными «случайным» образом. Это слово всегда будет означать, что мы рассматриваем некую обобщенную систему, чтобы выяснить ее *типичные* свойства и этим путем прийти к каким-то точным выводам об определенном *классе* систем.

13.2. Особое значение для последующих глав будет иметь класс систем, состоящих из частей, которые соединяются случайным образом и имеют относительно большое число состояний равновесия (по отношению к общему числу состояний).

Говоря точнее, предположим, что перед нами весьма большое число более или менее однородных частей, которые образуют свой собственный «мир» с каким-то распределением элементов. Предполагается, что каждая часть представляет собой систему, определяемую состоянием, и поэтому в ее изменении *совершенно отсутствует элемент случайности*. Как небольшая машина с входом, она, находясь в известном состоянии и в известных условиях, будет вести себя известным

образом; и она будет вести себя так всякий раз, когда это состояние и эти условия повторятся.

Возьмем теперь выборку из этих частей с помощью какого-либо ясно определенного метода и получим таким образом какую-то определенную совокупность частей. (Мы не предполагаем, что все части имеют равную вероятность попасть в эту выборку.) Затем мы возьмем выборку из возможных способов их соединения, опять-таки с помощью ясно определенного метода, и получим какой-то один способ соединения.

Определенная совокупность частей, соединенных определенным образом, составит нашу окончательную систему.

Эта окончательная система, нужно заметить, будет системой, определяемой состоянием. Она *не* стохастическая в том смысле, что она не способна из данного состояния и при данных условиях совершать различные переходы с разной вероятностью. Таким образом, *индивидуальная* система вовсе не содержит элементов случайности. Случайность вносит наблюдатель или экспериментатор; его мало интересует индивидуальная система, взятая путем выборки, но весьма интересует та «популяция» (множество систем), из которой она была взята, точно так же как нейрофизиолога интересует совокупность объектов, называемых «головной мозг млекопитающего». «Случайность» возникает от того, что наблюдатель встречается с системой, интересующей его только потому, что она типична для совокупности систем. Рассматривая данную популяцию в качестве пространства выборки (полученного от двух первичных пространств), наблюдатель вправе говорить о *вероятности* встретить систему с известным поведением или с известным свойством.

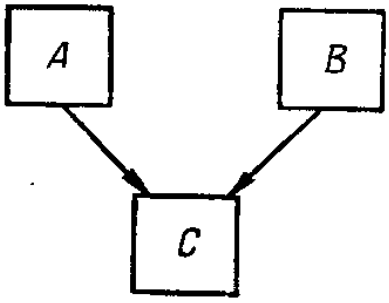
Если к этой спецификации добавить условие, что исходные части должны иметь много состояний равновесия (как, например, системы, упомянутые в § 12.15), то мы получим систему того типа, о котором мы часто будем говорить в дальнейшем. За неимением лучшего термина я буду называть ее **полистабильной** системой.

Коротко говоря, это любая система, части которой имеют много состояний равновесия и которая образована путем случайного подбора частей и соединения их случайным образом (при условии, что этим словам придается точный смысл, указанный выше).

Любые определения, однако, могут быть окончательно оправданы только результатами их практического применения. В остальной части книги будут показаны некоторые свойства системы этого интересного типа, которая представляет собой ключевую систему, если мы применяем нашу основную стратегию, описанную в § 2.17.

13.3. Демонстрируя эти свойства, мы не будем обсуждать одну определенную систему, охарактеризованную во всех деталях, а будем рассматривать класс систем. При обсуждении класса систем нельзя забывать об одном важном различии, которое *мы* должны делать произвольно: 1) обсуждаем ли мы то, что *может* произойти? — вопрос, концентрирующий внимание на крайних возможностях, следовательно, на редком и исключительном,— или 2) мы обсуждаем то, что *обычно* происходит? — вопрос, сосредоточивающий внимание на центральной массе случаев, следовательно, на обычном и ординарном. Оба вопроса могут быть уместными; но поскольку ответы на них совершенно различны, мы должны тщательно избегать их смешения.

13.4. Рассмотрим одно свойство *всех* систем, определяемых состоянием, которое будет иметь большое значение в дальнейшем. Если в системе, определяемой состоянием, какая-то подсистема не изменялась, а затем начала изменяться, то можно заключить, что в тот момент, когда она начала изменяться, среди ее параметров был по крайней мере один такой, который сам изменялся. Изменение может происходить только от изменения. Почему это так, нетрудно видеть. Если на переменную или подсистему C непосредственно влияют только параметры A и B (см. схему на стр. 254), если A и B в течение какого-то времени постоянны и если в это время C перешло из состояния c в то же самое состояние (т. е.



если c — состояние равновесия), то для того, чтобы поведение C было закономерным, переход $c \to c$ должен повторяться до тех пор, пока A и B сохраняют прежнюю величину, т. е. остаются постоянными. Если C — система, определяемая состоянием, то переход от c к какому-либо другому состоянию может произойти только после того, как A или B, по какой бы то ни было причине, изменит *свою* величину.

Таким образом, если подсистема, определяемая состоянием, находится в равновесии и окружена постоянными параметрами (возможно, они являются переменными других подсистем), то для нее это равновесие служит как бы ловушкой. Оказавшись в состоянии равновесия, она не может выйти из него до тех пор, пока какой-либо внешний фактор не заставит ее тоже измениться. Ярким примером могут служить огоньки, блуждающие по обугленной бумаге: каждый участок бумаги, хотя он и способен гореть, стабилен, пока остается холодным; один огонек может превратиться в два, могут происходить различные другие события, но холодная бумага не может загореться, пока не возникнет огонек хотя бы в одной из соседних точек. До тех пор пока остается хоть один огонек, нельзя заранее установить пределы того, что́ может произойти; но если вся бумага пришла в состояние «огня нет», то в дальнейшем она уже не будет изменяться.

Движение к равновесию

13.5. Посмотрим теперь, как полистабильная система будет приближаться к своему конечному равновесию. На первый взгляд здесь как будто бы нечего обсуждать,

так как если поведение частей определяется состоянием и дан способ их соединения, то и целое будет системой, определяемой состоянием; если в какой-то момент ее предоставить самой себе, то она по некоторой линии поведения направится к своему конечному циклу (или точке) равновесия — точно так же, как в любом другом случае.

Однако тот факт, что части полистабильной системы обладают множеством состояний равновесия и способны к вре́менной стабилизации, вносит ряд особенностей, заслуживающих внимания: из них, как мы увидим дальше, вытекают интересные следствия, касающиеся поведения живых организмов.

13.6. Для описания поведения этих довольно сложных систем полезно ввести следующий показатель. В каждый данный момент вся система, а значит, и каждая из ее переменных, находится в определенном состоянии; состояние каждой переменной является для нее либо равновесным, либо неравновесным (в условиях, заданных остальными переменными). *Число переменных*, находящихся в состоянии равновесия, мы будем обозначать буквой i. Если целое состоит из n переменных, то i, очевидно, должно лежать в пределах от 0 до n.

Если i равно n, то каждая переменная находится в состоянии равновесия в условиях, заданных остальными переменными, так что и целое находится в равновесии (§ 6.8). Если i не равно n, то другие переменные числом $(n—i)$ изменят свое значение при очередном переходе. Тогда наступит новое состояние целого и i примет новое значение. Таким образом, при движении целого вдоль некоторой линии поведения i будет изменяться и мы сможем лучше понять поведение целого, если рассмотрим, как будет вести себя i с течением времени.

13.7. Если дана система и дано ее начальное состояние, поведение i будет строго детерминировано. Однако для целого класса систем поведение i охарактеризовать трудно, если не считать двух предельных случаев, в которых оно будет простым и ясным. Сравнение этих предельных случаев даст нам путеводную нить, которая принесет

неоценимую пользу в последующих главах, так как сильно приблизит нас к решению основной проблемы, поставленной в гл. 11. (Устанавливая, чтó происходит в двух особенно простых и ясных случаях, мы следуем стратегии, описанной в § 2.17.)

13.8. Один предельный случай — это полистабильная система с очень сильно развитыми связями, в которой почти каждая переменная соединена почти со всеми остальными. (В схеме непосредственных воздействий для такой системы пришлось бы начертить почти все из $n(n-1)$ возможных стрелок.) Рассмотрим случай, в котором (как это было в § 12.15) вероятность равновесного состояния (p) для каждой подсистемы очень велика и все вероятности независимы. Как будет вести себя i? (Здесь мы хотим знать, чтó будет происходить обычно; чтó *может* произойти, нас мало интересует.)

Вероятность равновесного состояния для каждой части равна p, и поэтому при условии независимости (вероятностей) вероятность того, что целое из n переменных окажется в состоянии равновесия, будет равна p^n (согласно § 6.8). Если p не очень близко к 1, а n велико, то величина p^n будет чрезвычайно малой (§ 11.4). Величина i обычно будет недалека от np (т. е. в каждый данный момент доля частей, находящихся в равновесии, будет близка к p). Тогда линия поведения будет неопределенно блуждать около этой величины и целое придет в состояние равновесия в том и только в том случае, если i случайно достигнет своей максимальной величины (n). Таким образом, мы получаем, по существу, ту же картину, что и в § 11.3: мы имеем систему, линии поведения которой длинны и сложны, а шансы на достижение равновесия в более или менее короткое время при большом n крайне малы. В этом случае время, необходимое для того, чтобы целое достигло равновесного состояния, будет чрезвычайно длительным, подобным T_1 в § 11.5.

13.9. Особенно интересно, чтó произойдет, если i случайно будет очень большим, но еще не равным n. Пред-

положим, например, что в системе рассматриваемого типа, состоящей из 1000 переменных, i достигло 999. Теперь целое близко к равновесию, но что произойдет дальше? Одна переменная не достигла равновесия и будет изменяться. Так как система сильно насыщена связями, большинство из 999 остальных переменных окажется в следующий момент (или при очередном ступенчатом сдвиге) в измененных условиях; для того чтобы состояние каждой из них *и теперь* было равновесным, требуется совпадение 999 событий, вероятность каждого из которых равна p, так что i скорее всего просто вновь упадет до своей средней величины. Таким образом, насыщенная связями форма полистабильной системы, даже если она подойдет очень близко к состоянию равновесия (в том смысле, что большинство ее частей достигнет его), не сможет сохранить эту близость, а почти наверное возвратится к какому-то «среднему» состоянию. Значит, для такой системы типична неспособность закреплять частичные или местные успехи.

13.10. Предполагая, что число n по-прежнему велико и вероятности независимы, сравним только что описанное поведение (речь шла о системе, значительно или предельно насыщенной связями) с поведением полистабильной системы, в которой первичные связи между переменными немногочисленны. (Сходная система получится и в том случае, если сделать p очень близким к 1: поскольку большинство переменных бóльшую часть времени будет находиться в равновесии, т. е. не будет изменяться, функционирующие связи, согласно § 12.17, тоже будут малочисленны.) Как в этом случае будет вести себя i, особенно тогда, когда число связей приблизится к нулю?

Рассмотрим случай, когда оно действительно достигло нуля. Система теперь идентична такой системе из n переменных, в которой между переменными вовсе нет связей; это только в номинальном смысле «система». Любая из ее частей, пришедшая в состояние равновесия, должна оставаться в нем, так как никакое воздействие не может дойти до нее. Если сравнить два

состояния целого — более раннее и более позднее,— то все части, находившиеся в состоянии равновесия в первом состоянии, будут входить в него и во втором; поэтому *величина i не может уменьшаться со временем.* Обычно она будет, разумеется, возрастать. Таким образом, система этого типа *постепенно* приближается к своему конечному состоянию равновесия. Ее движение к нему, по существу, сходно с тем, какое мы видели в 3-м случае в § 11.5, ибо для конечного равновесия достаточно, чтобы к нему пришла наиболее «медлительная» часть. Поэтому время, необходимое для достижения равновесия, будет близко к T_3, т. е. не будет чересчур долгим.

13.11. Два рассмотренных нами типа полистабильных систем находятся на противоположных полюсах, и в реальном мире редко можно встретить систему, точно соответствующую одному из них. Тем не менее они важны, если мы применяем стратегию, описанную в § 2.17, так как это ясно очерченные типы с ясно очерченными свойствами; если реальная система близка к одному из них, мы имеем основание утверждать, что ее свойства также будут близки к свойствам систем этого типа.

Поведение полистабильных систем, промежуточных между этими двумя, весьма сложно. В таких системах будет возникать (см., например, § 12.17) калейдоскопическое разнообразие подсистем, которые будут существовать лишь недолгое время; некоторые из них сохранят в течение короткого времени стабильность, но затем будут изменяться и распадаться, теряя свою индивидуальность. Число стабильных переменных i может то возрастать, когда несколько подсистем сохраняет стабильность, то снова в той или иной степени снижаться, когда они становятся нестабильными. Колебания будут значительными до тех пор, пока одна из волн не подбросит показатель i до величины n, где он и останется.

Бóльший интерес представят для нас системы, находящиеся ближе к пределу разобщенности, где тенден-

ция i к кумулятивному возрастанию выражена сильнее; здесь i, хотя и обнаруживает некоторые колебания и часто немного сползает назад, все же проявляет заметную склонность приближаться к величине n. Имея дело с такого рода системой, экспериментатор увидит, как i неоднократно будет возвращаться к n после смещения, и у него создастся впечатление, что i «старается» достичь n.

13.12. До сих пор мы обсуждали только первый случай, описанный в § 12.15; а что если бы полистабильная система всецело состояла из частей, равновесные состояния которых характеризуются порогом? Этот вопрос будет особенно интересовать нейрофизиолога, хотя представит меньше интереса для тех, кто намерен работать с адаптирующимися системами иных типов.

Наличие порога исключает сделанное ранее предположение о независимости вероятностей: теперь шансы на состояние равновесия для той или иной переменной будут варьировать в известном соответствии с величинами ее параметров. В случае двух или большего числа нейронов это соответствие будет одним при возбуждающем действии и другим — обратным — при тормозном действии. (При наличии как возбуждающих, так и тормозных связей результат может приближаться к независимости вероятностей.) Дальнейшее исследование ввело бы нас в подробности, излишние в нашем обзоре; в настоящее время мало что можно сказать по этому вопросу.

13.13. Подведем итоги. Если полистабильная система составлена из частей, равновесные состояния которых распределяются независимо от состояний их входных величин, то путь ее к конечному равновесию в значительной мере зависит от числа функциональных связей.

Когда связей много, линия поведения обычно бывает сложной и, при большой величине n, чрезвычайно длинной; поэтому для того, чтобы целое пришло к равновесию, обычно требуется чрезвычайно долгое время. Когда линия приходит к состоянию, в котором число

стабильных переменных необычно велико, система не способна сохранить этот избыток.

Когда связей мало (при малочисленности первичных соединений или при большом числе неизменяющихся частей), линия поведения обыкновенно коротка, так что целое быстро приходит к состоянию равновесия. Когда линия приходит к состоянию, в котором число стабильных переменных необычно велико, система способна сохранять этот избыток в течение некоторого времени и таким образом приближаться к полному равновесию путем накопления состояний равновесия в отдельных ее частях.

Дисперсия

13.14. У полистабильной системы есть еще одно свойство, заслуживающее особого внимания.

Возьмем участок любой линии поведения такой системы. Проследив поведение каждой переменной, мы можем отметить, изменила ли она свою величину на протяжении данного участка. Например, на фиг. 51 на участке, отмеченном буквами B и C, y и z изменяются, а x остается постоянной. На участке, отмеченном буквой F, изменяются x и z, а постоянной остается y. Тот факт, что активные переменные первого участка (y и z) не совпадают с активными переменными второго (x и z), я буду называть дисперсией. (В нашем примере участки принадлежали одной линии, но два участка могут принадлежать и разным линиям.) Как показывает этот пример, дисперсия не означает, что две группы активных переменных не содержат общего элемента, необходимо только, чтобы эти две группы не были тождественными.

Значение дисперсии будет показано в § 13.17. Здесь мы должны отметить одну существенную особенность: хотя оба участка могут начинаться с точек, различающихся лишь значением одной или нескольких переменных (как в § 12.3), в результате последующих изменений

могут оказаться активированными совершенно разные группы переменных (§ 12.18), имеющие различную локализацию в системе. Таким образом, важный феномен, состоящий в том, что различные *формы распределения активности* (или *величины* параметров) в одном месте ведут к активациям в разных *местах* системы, не требует никакого специального механизма: это обычное явление в любой полистабильной системе.

13.15. Если два «места» должны лишь минимально перекрывать друг друга и если система не должна быть специально приспособлена для разделения определенных сочетаний входных величин, то все, что требуется — это чтобы почти все состояния частей были равновесными. Тогда число активных частей будет невелико; если доля их в общем числе частей обычно близка к r и если активные переменные распределяются независимо, то доля активных частей, общих для двух групп (т. е. область перекрытия), составит около r^2. Эта величина может быть сделана сколь угодно малой путем достаточного уменьшения величины r, чего можно достигнуть подбором таких частей, для которых процент равновесных состояний очень близок к 100. Таким образом, полистабильная система может отвечать на два различных входных состояния изменениями двух разных групп переменных, лишь незначительно перекрывающих друг друга.

13.16. Позднее мы выскажем предположение, что дисперсия широко используется в нервной системе. Но сначала мы должны отметить, что она не менее широко используется в органах чувств.

То обстоятельство, что органы чувств не одинаковы, обусловливает первичную дисперсию. Например, если на лицо падает излучение с длиной волны 0,5 μ, то оно служит раздражителем для глаза, но не для кожи. Поэтому возбуждение возникнет в зрительном нерве, но не в тройничном. Если же длина волны превысит 0,8 μ, вместо зрительного будет возбужден тройничный нерв. Дисперсия произошла потому, что изменение раздражителя привело к перемещению возбуждения

(активности) с одной группы анатомических элементов (переменных) на другую.

В коже находятся гистологически различимые рецепторы, чувствительные к прикосновению, боли, теплу и холоду. Если игла, сначала слегка прикасавшаяся к коже, начнет прокалывать ее, возбуждение переместится с рецепторов прикосновения на болевые рецепторы, т. е. произойдет дисперсия.

Приводит ли изменение цвета светового раздражителя к перемещению возбуждения с одной группы элементов сетчатки на другую, еще не вполне ясно. Но дисперсия несомненно происходит, когда источник света меняет свое положение в пространстве: если глаз неподвижен, возбуждение перемещается с одной группы рецепторов на другую. Хрусталик служит, по существу, приспособлением, обеспечивающим дисперсию; в примитивном «глазном пятне» простейших дисперсия произойти не может.

Таким образом, мы видим, что дисперсия неизбежно возникает еще до того, как результаты воздействия раздражителей достигнут центральной нервной системы: различные раздражители не только достигают нервных центров в качественно различной форме, но часто идут разными путями и возбуждают разные группы клеток.

13.17. Очевидно, что одна из важных функций органов чувств состоит в обеспечении дисперсии. В пользу того, что дисперсия происходит или поддерживается в нервной системе, говорят две группы данных.

То обстоятельство, что нейронным процессам обычно бывает свойствен порог и что, следовательно, функциональные элементы часто бывают неактивны (§ 12.15), позволяет думать, что дисперсия здесь *неизбежна* (согласно § 12.16).

Более прямым указанием служит тот факт, что в известных нам случаях проводящие нервные пути от органов чувств к коре мозга по меньшей мере сохраняют ту дисперсию, которая произошла в самом органе. Например, однозначное соответствие между точками

сетчатки и точками зрительной зоны коры обеспечивает сохранение дисперсии, достигнутой в сетчатке. Точно так же однозначное соответствие, которое, как теперь известно, создается проекцией слухового нерва на височную область коры, обеспечивает сохранение дисперсии, обусловленной различиями в высоте звука. Таким образом, есть большие основания полагать, что дисперсия играет в нервной системе важную роль.

Локализация в полистабильной системе

13.18. Как будут локализованы в полистабильной системе реакции на раздражитель? Каково будет распределение группы активных переменных во всей совокупности переменных?

В такой системе реакция на данный раздражитель при данном начальном состоянии будет регулярной и воспроизводимой, так как целое представляет собой систему, определяемую состоянием. В этом отношении поведение целого вполне закономерно. Но когда наблюдатель обратит внимание, *какие* переменные обнаружили активность, оно, вероятно, покажется ему неупорядоченным, так как детали путей распространения активности определялись методом выборок и активированные переменные будут, вероятно, разбросаны по всей системе в кажущемся беспорядке (см. § 13.4). Таким образом, вопрос «локализована ли реакция?» двусмыслен, так как на него можно дать два ответа. Нужно ответить «да» — в том смысле, что активируются вполне определенные переменные всей системы, но «нет» — в том смысле, что распределение этих переменных не поддается какому-либо простому описанию.

Быть может, это легче будет понять на примере распределения в городе труб, которые «дымят», когда ветер дует в определенном направлении. Будет ли данная труба дымить, зависит от местных условий: ветер определенной силы и направления будет регулярно вызы-

вать одни и те же вихревые движения, от которых и будет зависеть поведение трубы. Но «географическое» размещение дымящих труб не обнаружит какой-либо простой закономерности; если на плане города отметить черной точкой каждую трубу, дымящую при восточном ветре, и красной точкой — каждую трубу, дымящую при западном ветре, то черные и красные точки, вероятно, окажутся беспорядочно перемешанными. Таким образом, явление «дымящей трубы» в деталях детерминировано, но его географическое распределение будет случайным.

13.19. Такого же рода «локализацию» мы имеем и в полистабильной системе. В той мере, в какой мозг (особенно кора большого мозга) соответствует полистабильной системе, мы можем ожидать, что «локализация» в нем будет того же типа. На основе этой гипотезы мы могли бы ожидать от головного мозга следующего поведения.

События в окружающей среде будут создавать непрерывный поток информации, который будет через органы чувств достигать нервной системы. Группа переменных, активируемых в некоторый момент, обычно будет отличаться от группы переменных, активированных в один из последующих моментов; активность будет распространяться и перемещаться с такой же кажущейся беспорядочностью, с какой капли дождя, сливаясь и разделяясь, стекают вниз по оконному стеклу. Но несмотря на эту видимую беспорядочность перемещений, поведение целого воспроизводимо и определяется начальным состоянием; если та же самая реакция начнется когда-либо позже, то те же исходные раздражители встретятся с теми же местными деталями, создадут те же комплексы возбуждений, которые будут взаимодействовать с последующими раздражителями так же, как это было раньше, и в результате линия поведения будет той же, что и в первый раз.

В такой системе удаление части материала дало бы эффект, сходный с тем, что установили многие исследователи в опытах с корой большого мозга. В этом отно-

шении типичны работы Павлова и Лэшли. Павлов вырабатывал у собак разнообразные условные рефлексы, затем удалял различные участки коры и наблюдал влияние этого удаления на выработанные реакции. Лэшли обучал крыс проходить через лабиринты и прыгать в обозначенные отверстия, после чего наблюдал действие аналогичных операций на приобретенные навыки. Результаты оказались весьма сложными, но некоторые общие тенденции были ясны. Операции, затрагивающие какой-либо орган чувств или первые участки путей, проходимых сенсорными импульсами в нервной системе, обычно весьма разрушительно сказываются на реакциях, в которых используется данный орган. Например, условный рефлекс на звонок обычно исчезает после разрушения улиток, перерезки слуховых нервов или удаления височных долей коры. Точно так же реакции, включающие определенный вид двигательной активности, чаще всего серьезно нарушаются, если центр данного вида активности поврежден. Однако удаление коры в других частях большого мозга давало неясные результаты. Удаление почти каждой части вело к известному нарушению реакции независимо от локализации этой части и от типа исследуемого рефлекса или навыка; и нельзя было найти ни одной части, удаление которой специфически разрушало бы реакцию или навык.

Эти результаты создали огромные трудности для многих теорий мозговых механизмов, но они вполне совместимы с теорией, выдвигаемой в нашей книге. Ибо в обширной полистабильной системе целостная реакция основана на активации многочисленных элементов, широко «разбросанных» по системе. Конечно, любое точное утверждение нужно было бы тщательно сформулировать, но легко видеть, что как производство бумаги в Англии не было бы остановлено опустошением любого отдельного графства, так и реакция, основанная на действии многочисленных и широко разбросанных элементов, будет в общем более стойкой по отношению к местным повреждениям, чем реакция, связан-

ная с немногими компактно расположенными элементами.

13.20. Лэшли обратил внимание на эту возможность в 1929 г.; он писал, что локализация отдельных следов памяти была бы совместимой с основными данными, имеющимися в нашем распоряжении, если бы эти следы были множественными и были широко разбросаны по всей коре мозга, объединенные функционально, но не анатомически. Однако он не подверг это предположение дальнейшей разработке, и причину нетрудно понять, если рассмотреть вытекающие из него следствия.

Такая локализация выглядела бы, конечно, беспорядочной; но «беспорядочность» сама по себе мало что значит. Например, на автомобильном заводе запасные части могли бы храниться таким образом, что задние фары лежали бы рядом с радиаторами, а выхлопные трубы — с компрессионными масленками; но подобное отсутствие видимого порядка не имело бы значения, если бы существовал способ в случае необходимости быстро найти нужный предмет. В коре мозга более серьезное значение имеет добавление новой реакции; чисто случайная дисперсия не дает никаких способов устанавливать определенные отношения между локализациями. Она не только не препятствует тому, чтобы связанные между собой реакции активировали удаленные друг от друга переменные, но и не обеспечивает различения совершенно не связанных между собой реакций; она даже допускает, чтобы они использовали общие переменные. Мы не можем исходить из того, что не связанные друг с другом реакции всегда настолько различаются по своим сенсорным формам, что вызываемые ими активации всегда будут разобщены, так как совершенно не связанные друг с другом раздражители иногда могут оказаться весьма сходными. Между тем дифференциация их подчас может иметь очень важное значение — например, в джунглях ряд вертикальных полос может оказаться и стеблями тростника и затаившимся тигром.

Мало того, что дисперсия ведет к беспорядочному соединению подсистем, создающему большие возмож-

ности случайного взаимодействия и смещения; еще больше путаницы добавляет каждый новый акт научения. Даже если установился какой-то порядок в отношениях между прежними реакциями, каждому добавлению новой реакции предшествует период случайных проб и ошибок, который неизбежно будет вызывать изменения в ступенчатых механизмах, уже приспособленных к прежним реакциям, вызывая тем самым нарушение последних. Таким образом, на первый взгляд могло бы показаться, что подобная система неизбежно приведет к хаосу. Тем не менее я надеюсь показать (в § 15.4 и дальше), что в действительности основная тенденция, весьма вероятно, будет состоять в непрерывно возрастающей адаптации.

Глава 14

ПОВТОРНЫЕ РАЗДРАЖИТЕЛИ И ПРИВЫКАНИЕ

14.1. В этой главе мы продолжаем исследовать полистабильную систему, но несколько отступаем от основной линии: читатель, который перейдет прямо к гл. 15, ничего не потеряет в смысле логической связи. Тем не менее настоящая глава включена в книгу по двум причинам.

Во-первых, здесь читатель получит некоторую «практику» в рассмотрении полистабильных систем и увидит, каким образом системы этого типа можно обсуждать в общей и в то же время точной форме.

Во-вторых, эта глава еще раз иллюстрирует один из основных тезисов книги. Когда система «идет к равновесию», первое впечатление таково, что все интересное уже позади; это впечатление часто бывает верным, когда система проста и равновесие похоже на состояние часов, у которых кончился завод. Однако мы стремимся показать в этой книге, что когда к равновесию идет *сложная* система, состояния различных ее частей при достижении равновесия находятся в сложных отношениях (и это как раз часто упускают из виду). При изучении этих отношений вскрываются необычные, поразительные особенности, представляющие чрезвычайно большой интерес именно для тех, кто изучает поведение живых существ. Например, в гл. 8 (о гомеостате) мы показали «только» систему, движущуюся к равновесию (см., например, фиг. 37); и все же вследствие того, что система и условия были «структурированными», можно было проследить интересные отношения между действиями и взаимодействиями различных

частей при конечном равновесии и на пути к нему. Эти отношения представляют собой то, что мы определили в гл. 5 как «адаптацию». В настоящей главе мы дадим еще один пример того, как система, «всего только» идущая к равновесию при сложном комплексе повторяющихся входных величин, тоже характеризуется поведением, интересным для психолога и физиолога.

14.2. Начнем с определения. Когда поле содержит много равновесных состояний, тогда, поскольку каждая линия поведения должна оканчиваться на *каком-то* состоянии равновесия (или цикле), линии поведения группируются таким образом, что линии одной группы сходятся к одному общему концу (циклу или состоянию равновесия). Поэтому поле может быть разделено на ячейки (конфлюэнты), каждая из которых содержит одно и только одно состояние равновесия (или цикл), к которому в конце концов приходит каждая линия поведения, проходящая в данной области. Основное свойство такой ячейки состоит в том, что репрезентативная точка, вначале находившаяся в любом ее пункте, 1) не может выйти из ячейки и 2) придет к состоянию равновесия или циклу, в котором и будет оставаться до тех пор, пока не изменятся значения параметров.

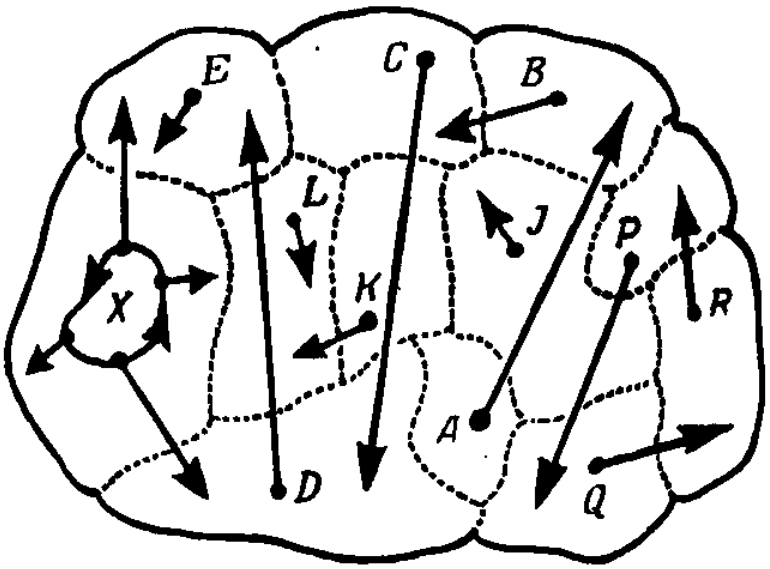
Разделение всего поля на такого рода ячейки свойственно не машинам какого-то особого типа, а всем системам, определяемым состоянием и имеющим больше одного состояния равновесия или цикла.

Привыкание

14.3. Посмотрим теперь, что произойдет, если на систему будет повторно воздействовать один и тот же импульсный (§ 6.5) раздражитель S и промежутки между повторными раздражениями будут достаточно длительными для того, чтобы система приходила в состояние равновесия до наступления очередного раздражения.

Согласно § 6.5, импульсный раздражитель S будет смещать репрезентативную точку из любого данного

состояния в определенное иное состояние. Таким образом, действие раздражителя S (на репрезентативную точку, находящуюся, как только что сказано, в состоянии равновесия) состоит в том, что он переносит ее в какую-то определенную точку поля и там освобождает ее. На фиг. 52 показаны различные варианты этого процесса.



Фиг. 52. Поле системы с 12 конфлюэнтами, каждый из которых содержит состояние равновесия (показанное точкой) или цикл (X, слева).

Стрелками показаны смещения, вызываемые раздражителем, когда репрезентативная точка находится в том или ином состоянии равновесия или на одном из участков цикла X.

Предположим, система находится в равновесии в точке A; в результате воздействия S репрезентативная точка переходит к противоположному концу стрелки, в данном примере — в другую ячейку. После этого система, согласно гипотезе, остается предоставленной самой себе, пока она не придет в равновесие; это означает, что будет действовать основное поле, которое приведет ее в данном случае к равновесному состоянию B. Здесь система останется до следующего воздействия S, которое в этом примере переместит ее в новую ячейку; теперь основное поле приводит ее к состоянию равновесия C. Так поочередное воздействие S и основного поля переносит систему из одного состояния равновесия

в другое, пока она не достигнет точки E. Из этого состояния S смещает ее только в пределах той же ячейки, и спонтанное изменение системы приводит к ее возвращению в E. Теперь раздражитель S (оказывающий, согласно гипотезе, однозначно определенное действие) переносит ее на другой конец стрелки, откуда она снова возвращается в E. Эта ситуация будет конечной, и репрезентативная точка теперь «захвачена» ячейкой E.

Можно видеть, что этот процесс *избирателен*; репрезентативная точка заканчивает свои странствия в такой ячейке, в которой S-смещение *не выводит* систему за пределы ячейки. Такие ячейки, как A, C и D, при S-смещении вызванном внешним фактором, не могут удержать в себе репрезентативную точку в условиях рассматриваемого процесса; такие ячейки, как E, J и L, могут «захватить» ее.

14.4. На фиг. 52 показаны два осложнения, которые следует рассмотреть ради полноты.

Первое (показанное в правой части схемы) состоит в том, что могут происходить события, при которых процесс перемещения репрезентативной точки циклически проводит ее через ячейки P, Q, R, P, Q, P, ...

Второе осложнение показано слева (X), где ячейка содержит цикл. Раздражитель S может вызывать ряд различных смещений из этого цикла, смотря по тому, в какой момент воздействует импульс (т. е. где именно окажется в этот момент репрезентативная точка).

Вопрос о том, обычны ли в нервной системе такие циклы (внутри ячеек или между ними), должен решаться экспериментом. Цикл, заключенный *внутри* ячейки (например, X), вряд ли повлияет на выводы, которые будут сделаны ниже; в этом случае либо все S-смещения лежат внутри ячейки (тогда репрезентативная точка, как уже говорилось, будет захвачена ею), либо репрезентативная точка рано или поздно выйдет из ячейки (и цикл уже не будет нас интересовать). Например, на фиг. 52, если только период цикла не находится в каком-то простом точном отношении к частоте воздействия S (вероятность этого равна нулю, если обе величины

могут изменяться непрерывно), репрезентативная точка действительно покинет цикл X и в конце концов будет захвачена ячейкой E. (Цикл P, Q, R, вносит осложнения, которые можно рассмотреть лишь при более детальном анализе.)

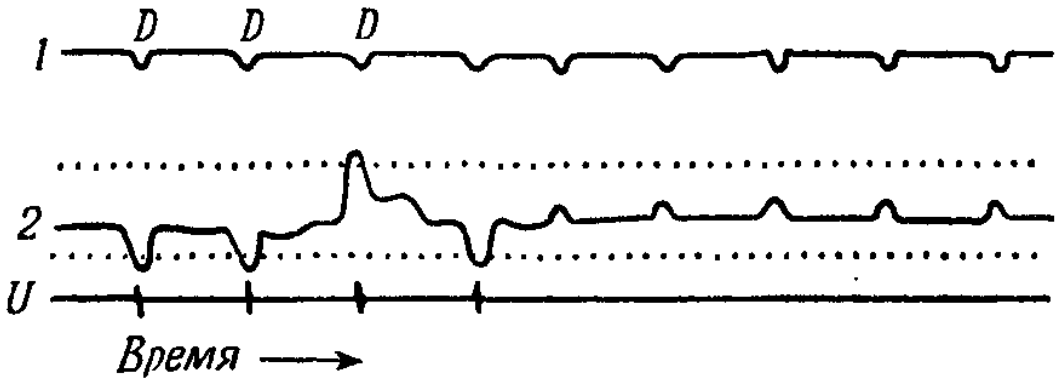
14.5. Данное описание не является строгим, но его легко сделать вполне точным. Оно приводится только для иллюстрации того тезиса, что при повторяющемся раздражителе (если интервалы между повторениями достаточны для того, чтобы система пришла к состоянию равновесия) полистабильная система *избирательна*, так как рано или поздно ее репрезентативная точка попадает *в ячейку, из которой раздражитель не может вывести ее*. И если фазовое пространство обладает метрикой и непрерывностью, то расстояние, на которое раздражитель S в конце концов смещает точку, будет *меньше среднего расстояния*, так как короткие стрелки имеют преимущество. Таким образом, «количество изменения», вызываемого последовательными воздействиями S, смещается от средней величины к некоторой меньшей величине.

Здесь мы можем обойтись без вычислений, касающихся точного количества: их можно оставить для тех, кто специально интересуется этим вопросом. Мы должны лишь отметить, что результат данного процесса *не симметричен*. Представляя себе случайным образом составленную систему из случайных частей, мы склонны делать вывод, что ее реакция на повторяющееся раздражение может с одинаковой вероятностью возрастать или уменьшаться. Наши рассуждения показывают, что это не так: в самой основе системы заложена тенденция к уменьшению реакции.

Есть другая, гораздо более слабая, линия аргументации, с помощью которой можно сделать этот вывод более очевидным. Мы можем принять за аксиому, что «большие» реакции в общем вызывают больше изменений в системе (или связаны с бо́льшими ее изменениями), чем «малые». Если реакции оказывают какое-либо обратное действие на свои собственные причины, то «боль-

шие» реакции будут в общем вызывать большее изменение в том, что делает их «большими», «малые» же реакции лишь в небольшой степени влияют на факторы, делающие их «малыми». Поэтому факторы, вызывающие меньшую реакцию, по природе своей имеют больше шансов сохраниться, чем факторы, вызывающие бо́льшую реакцию. Отсюда и вытекает тенденция к уменьшению.

(Если этот вывод требует иллюстрации, можно рассмотреть такой вопрос: который из двух мальчиков,



Фиг. 53. Запись поведения гомеостата.

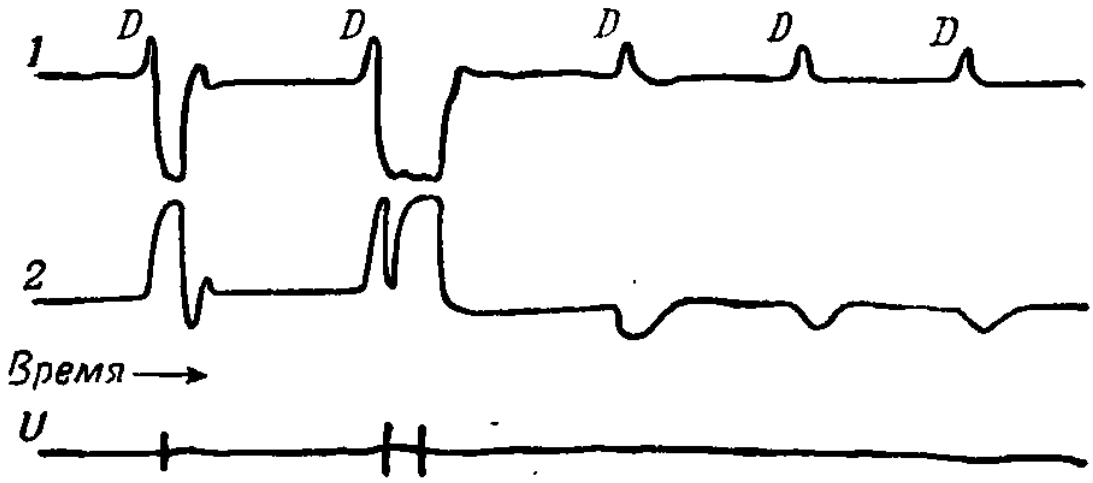
В каждый из моментов D оператор смещает магнит блока 1 на постоянный угол. Действие этого смещения доходит до блока 2 через его униселектор. Когда положение этого униселектора таково, что магнит блока 2 достигает критического состояния (показанного пунктиром), это положение изменяется. После четвертого изменения установка униселектора обусловливает лишь небольшое смещение магнита в блоке 2, и поэтому в дальнейшем она сохраняется.

самостоятельно устраивающих фейерверки, имеет больше шансов выжить — тот, который пытается устроить самый большой фейерверк, или тот, который старается сделать самый маленький?)

14.6. Процесс «привыкания» легко продемонстрировать, почти в банальной форме, с помощью гомеостата (который рассматривается здесь как система, характеризуемая переменной «положение униселектора», так что у него много равновесных состояний, отличающихся друг от друга величиной этой переменной).

Такой процесс показан на фиг. 53. Были соединены два блока по схеме 1 ⟶ 2. Действие 1 ⟶ 2 определялось положением униселектора блока 2, который изменял положение, если блок 2 переходил свои критические состояния. Тогда оператор повторно воздействовал

на блок 2, перемещая магнит блока 1 (D). Всякий раз, когда униселектор передавал блоку 2 «большой эффект», положение униселектора блока 2 изменялось. Но как только униселектор приходил в положение, при котором воздействие было недостаточным для того, чтобы приводить блок 2 к критическим состояниям, это положение фиксировалось. Таким образом, при повторении постоянного раздражителя (D) амплитуда реакции 2 постепенно уменьшалась.



Фиг. 54. Взаимодействие двух блоков гомеостата, образующих ультрастабильную систему.

В каждый из моментов D оператор смещает магнит блока 1 на постоянный угол. Первое же поле, при котором такое смещение не ведет к критическому состоянию, в дальнейшем сохраняется.

Тот же процесс в более сложной форме показан на фиг. 54. Взаимодействуют два блока: $1 \rightleftarrows 2$. Действие обоих проходит через униселекторы, так что целое ультрастабильно. В каждый из моментов D оператор смещал магнит блока 1 на одно и то же расстояние. После первого «раздражения» реакция блока 2 привела систему к ее критическим состояниям, и благодаря ультрастабильности было найдено новое окончательное поле. Второе раздражение вызвало такой же процесс. Но на этот раз окончательное поле оказалось таким, что смещение D уже не приводило блок 2 к критическим состояниям, и это поле, таким образом, закрепилось. И здесь при однотипном раздражении реакция уменьшилась.

14.7. В поведении животных явление «привыкания» встречается весьма часто: если на животное воздействуют повторные раздражители, реакция постепенно ослабляется. Некоторые авторы считали это изменение простейшей формой научения. Нейронные механизмы здесь не обязательны, так как «привыкание» ясно обнаруживается у простейших:

> «Амебы обладают отрицательным хемотаксисом на водопроводную воду или на воду, в которой содержалась какая-либо иная культура, но после переноса в такую воду они ведут себя нормально».
>
> «Если парамецию поместить в 0,5-процентный раствор хлористого натрия, она сразу же обнаруживает «реакцию избегания»... Если раздражающий агент не настолько силен, чтобы оказать прямое разрушительное действие, реакция через некоторое время прекращается и парамеции плавают в растворе так же, как они раньше плавали в воде».
>
> (Дженнингс)

Существовало мнение, что «привыкание» основано на утомлении, но в опытах Хэмфри утомление удалось исключить. Этот автор работал с улитками и воспользовался тем, что постукивание по доске, на которой сидит улитка, заставляет ее скрываться в раковину. Когда раздражение повторяют с короткими интервалами, улитка перестает реагировать. Хэмфри установил, что при легком постукивании привыкание наступает скоро, а при достаточно сильном — может не наступить вовсе. Согласно теории утомления, следовало бы ожидать обратного, так как оно должно наступать быстрее при более сильном раздражении, ведущем к более энергичному втягиванию улитки в раковину.

Выдвигалось множество специальных объяснений механизма привыкания, но то, что оно свойственно почти всем живым организмам, должно подсказывать нам, что в основе его, вероятно, лежит какой-то фактор,

гораздо более распространенный, чем нейрофизиологический. Сказанное в этой главе позволяет предположить, что он может в той или иной степени обнаружиться во всех полистабильных системах, если подвергать их воздействию повторного раздражителя или возмущения.

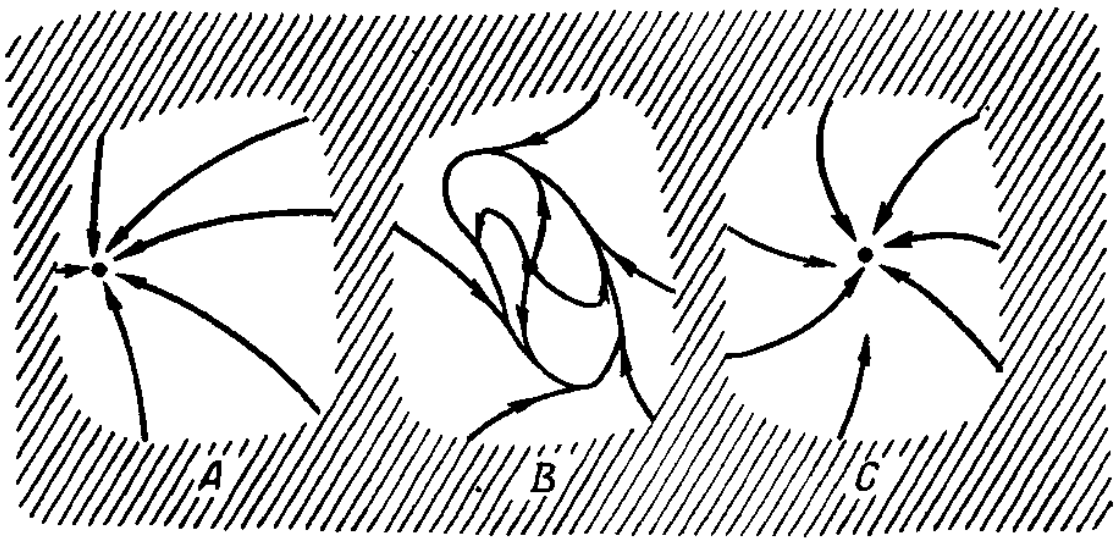
Слабые возмущения

14.8. Рассуждения совершенно такого же типа, состоящие в поисках возможного конечного состояния, применимы и в тех случаях, когда S — не в точности повторяемый раздражитель, так что «повторения» его образуют выборку из совокупности возмущений, имеющих какое-то характерное распределение. В этом случае фиг. 52, например, осталась бы неизменной в отношении ячеек и равновесных состояний, но стрелка, идущая от каждого равновесного состояния, потеряла бы свою однозначность и превратилась в пучок известным образом распределенных стрелок, из которых при каждом возмущении выбиралась бы методом выборок какая-либо одна.

Результат будет аналогичным. Репрезентативная точка вскоре покинет то равновесное состояние, от которого стрелки расходятся по другим ячейкам; а то равновесное состояние, от которого отходят стрелки, кончающиеся только внутри данной ячейки, будет служить для нее «ловушкой». Таким образом, полистабильная система (если она не содержит циклов) избирательно движется к таким равновесным состояниям, которые устойчивы к действию слабых нерегулярных возмущений.

14.9. Это относится ко всем возможным вариантам полей (главных переменных), избираемых ультрастабильной системой. Рассмотрим, например, три поля на фиг. 55, которые могут служить окончательными полями системы, представленной на фиг. 32. В полях A и C репрезентативная точка, предоставленная самой себе, направится к состоянию равновесия и останется в

нем. Если после этого произойдет смещение влево, то может случиться, что оно будет достаточно для того, чтобы репрезентативная точка достигла фронта критических состояний в поле A, но не в поле C; поэтому поле C может сохраниться после смещения, разрушившего поле A. Точно так же смещение репрезентативной точки, находящейся в цикле поля B, скорее приведет к изменению поля, чем такое же смещение в поле C. Таким образом, поле типа C с состоянием равновесия близ



Фиг. 55. Три поля ультрастабильной системы, обладающие различной устойчивостью по отношению к случайным малым возмущениям.
Области критических состояний заштрихованы.

центра «белой» области в общем более устойчиво к действию смещений, чем поля, в которых состояния равновесия или циклы находятся ближе к краю этой области.

14.10. Как проявилась бы эта тенденция в поведении живого организма?

В § 7.23 было показано, что поле может быть окончательным и в то же время иметь всевозможные причудливые особенности: циклы, равновесные состояния вблизи края «белой» области, одновременное наличие стабильных и нестабильных линий, множественные состояния равновесия, множественные циклы и т. д. Из-за такого разнообразия форм поля трудно решить, всегда ли окончательное поле пригодно для удержания

существенных переменных в нормальных пределах. Но в детальном исследовании надобности не было: мы только что видели, что все такие «причудливые» поля имеют тенденцию избирательно разрушаться, когда на систему время от времени воздействуют небольшие случайные возмущения. Поскольку такие возмущения неотделимы от реальных условий существования, в процессе «обтесывания» такие поля постепенно заменяются полями, сходными с полем C на фиг. 55; этот процесс действует просто таким образом, чтобы репрезентативная точка находилась подальше от критических состояний.

Глава 15

АДАПТАЦИЯ В ИТЕРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ И СИСТЕМАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЧАСТЕЙ[1]

15.1. В трех последних главах мы рассматривали главным образом «техническую» сторону, логику механизма для тех случаев, когда механизму свойственно частичное, флуктуирующее, временное подразделение на подсистемы, входящие в целое; специально был рассмотрен тот случай, когда подсистемы имеют много состояний равновесия. Теперь мы можем вернуться к логической линии, оставленной в § 11.13, и перейти к дальнейшему изучению вопроса о том, каким образом крупный и сложный организм может адаптироваться к обширной и сложной среде, не затрачивая на это почти бесконечно долгого времени (см. § 11.5).

В остальных главах будут приведены данные в пользу того, что дело обстоит следующим образом:

1. Распределение свойств обычной земной среды весьма отличается от распределения, исходя из которого мы получили в § 11.2 столь большие величины для времени адаптации.

2. В условиях действительного распределения свойств земной среды ультрастабильность часто может обеспечить адаптацию в достаточно короткие сроки.

3. Когда условия среды усложняются, время адаптации возрастает не только для теоретических ультрастабильных систем, но и для реальных живых систем.

---

[1] Под «итеративными системами» (iterated systems) автор подразумевает независимые друг от друга системы, вступающие в действие в необязательной последовательности. Под «системами с последовательным соединением частей» (serial systems) подразумевается цепь зависимых систем, вступающих в действие в строго определенной последовательности.— *Прим. ред.*

4. Когда среда чрезмерно сложна и запутанна, теоретическая ультрастабильная система и реальная живая система одинаково терпят неудачу.

В этой и последующих главах мы будем изучать формы среды постепенно возрастающей сложности. (Чтó имеется в виду под «сложностью», будет видно из дальнейшего.)

15.2. В § 11.11 было высказано предположение, что гомеостат (т. е. те его немногочисленные блоки, которые должны представлять «среду») не типичен для земной среды, так как каждая из его переменных непосредственно связана со всеми другими переменными и поэтому поведение каждой из них в любой момент обусловлено величинами *всех* остальных переменных системы. Что же в таком случае характерно с этой точки зрения для обычных форм земной среды?

Повседневный опыт показывает, что земной среде обычно свойствен ряд тесно связанных между собой особенностей:

1. Многие из переменных (часто большинство их) *не изменяются* на протяжении значительных промежутков времени и, таким образом, ведут себя как частично постоянные функции. Например, млекопитающее опирается на землю, которая почти всегда неподвижна; стволы деревьев сохраняют свое положение; чашка, поставленная на стол, стоит на месте, пока не появится сила, превышающая определенную величину. Если мы посмотрим на окружающий мир, то увидим, что только в самых хаотических формах среды все переменные изменяются. Это постоянство, эта распространенность частично постоянных функций должны быть обусловлены, согласно § 12.14, «обычностью» состояний равновесия в частях, составляющих земную среду. Итак, среда, окружающая живой организм, чаще всего состоит из частей с большим числом состояний равновесия.

2. С этим постоянством связан тот вполне естественный (согласно § 12.17) факт, что бóльшая часть переменных данной среды непосредственно воздействует лишь на немногие другие переменные из общего числа

переменных этой же среды. Например, если я сейчас опущу перо в чернильницу, это вряд ли повлияет хотя бы на одну из остальных переменных внутри комнаты. Если я открою дверь, это может вызвать перемещение нескольких листов бумаги, но никак не подействует на стулья, электрическое освещение, книги на полках и множество других вещей.

В сущности, нам снова приходится рассматривать свойства системы, связи которой изменчивы и зависят от ряда условий; этот тип среды мы уже встречали в § 11.12, и, следовательно, его можно изучать с помощью того же метода. Поэтому я высказываю предположение, что большинство форм среды, с которыми встречаются живые организмы на Земле, содержит много частично постоянных функций. И обратно: система из частично постоянных функций служит адекватной моделью весьма обширного класса обычных земных форм среды.

В качестве примера приведем описание одного часа жизни парамеции по наблюдениям Дженнингса и попутно будем отмечать частично постоянные функции.

> [Она плывет по направлению вверх и] «... наконец, достигает поверхностной пленки».

Поверхностные эффекты, равные нулю во всей толще воды пруда, будут изменяться как частично постоянные функции. Разрыв непрерывности такого типа (поверхность) может порождать частично постоянные функции самыми разными способами.

> «Вот произошло сильное сотрясение — может быть, кто-то бросил в воду камень».

В результате происходящих временами изменений этого типа будут изменяться многие переменные, причем их изменение будет носить характер частично постоянной функции.

> [Парамеция] «... попадает в слой воды со значительным недостатком кислорода».

Содержание кислорода будет варьировать иногда как частично постоянная, иногда как полная функция, смотря по тому, с каким участком среды мы имеем дело.

Дженнингс, до сих пор не упоминавший о содержании кислорода, очевидно, считал его постоянным.

«... она приближается к участку воды, согретому солнцем».

Температура воды будет вести себя то как частично постоянная, то как полная функция.

[Парамеция продолжает плавать и] «... оказывается вблизи свежего, недавно раздавленного стебля какого-то растения. Сок растения, вытекая, заметно изменяет химический состав воды».

В прочих местах концентрация веществ, входящих в состав сока, постоянна (равна нулю).

«Другие парамеции... часто сталкиваются друг с другом».

Давление на передний конец парамеции изменяется как частично постоянная функция.

«Инфузория может ударяться о камни».

Аналогичная частично постоянная функция.

«Инфузория наткнулась на разложившийся, размягченный лист».

Снова частично постоянные функции.

«... затем она попадает в область, где концентрация углекислоты повышена».

Концентрация углекислоты, в общем одинаковая, но с местными повышениями, будет изменяться в пространстве как частично постоянная функция.

«Наконец, она подходит к источнику углекислоты — к массе бактерий, погруженных в зооглею».

Еще одна частично постоянная функция, обусловленная соприкосновением.

Ясно, что экологический мир парамеции, так же как и места обитания большинства живых организмов, характеризуется множеством частично постоянных функций.

Среде в целом, или «внешнему миру», характеризуемому множеством частично постоянных функций, будет свойственна дисперсия: группа переменных, активных в один момент, часто будет отличаться от группы, активной в другой момент. Поэтому распре-

деление активности *внутри среды* не постоянно, а флуктуирует (см. § 13.18) в зависимости от различных условий. Когда животное взаимодействует со средой, наблюдатель видит, что активностью обладает то одна, то другая группа переменных, характеризующих среду. Если одна из групп активна в течение долгого времени, а остальные в это время неактивны и не имеют существенного значения, то наблюдатель может, если ему угодно, называть «средой» только первую группу. А если позже активность перейдет к другой группе, он может назвать ее «второй» средой. Именно наличие частично постоянных функций и дисперсии дает основание для такой перемены точки зрения.

Организм, пытающийся приспособиться к среде, характеризуемой главным образом частично постоянными функциями, найдет, что среда состоит из подсистем, которые иногда бывают независимыми, но время от времени обнаруживают взаимосвязь. Такое чередование ясно выявляется, когда мы учимся управлять автомобилем. Начинающему приходится иметь дело с целым рядом подсистем: он должен научиться владеть рулем и регулировать пространственное отношение автомобиля к дороге и пешеходам; он должен научиться пользоваться акселератором и усвоить его связь с числом оборотов двигателя, чтобы не разгонять машину и не терять скорость; наконец, он должен научиться так переключать передачу, чтобы при этом не перегревалась муфта сцепления и не ломались зубья передаточных шестерен. На открытой, ровной и свободной дороге он может на время забыть об акселераторе и коробке передач и может учиться управлять рулем так, как будто две другие системы не существуют; а на стенде он может обучаться переключению передач так, как будто руля вовсе нет. Однако при обычной поездке эти отношения изменяются. Значительную часть времени три системы —

Водитель + Руль +...
Водитель + Акселератор + ...
Водитель + Рычаг переключения передач +...

— можно было бы рассматривать как независимые, вполне самостоятельные системы. Но время от времени они взаимодействуют. В любой их паре есть общие переменные, относящиеся к водителю (к его рукам, ногам, мозгу), и, кроме того, некоторую связь может создавать машина или окружающий мир. Например, всякая попытка переключить передачу неизбежно связана с изменением положения акселератора и числа оборотов двигателя; резкому повороту должны предшествовать снижение скорости и переключение передачи. Итак, вся эта система обнаруживает то вре́менное и зависящее от условий разделение на подсистемы, которое типично для целого, характеризуемого главным образом частично постоянными функциями.

Таким образом, земная среда в основном соответствует системе полистабильного типа.

15.3. Для того чтобы исследовать действие ультрастабильности в условиях «неполностью связанной» среды, нам придется применить нашу основную стратегию (§ 2.17) и выбрать определенные случаи в качестве типовых. Поэтому мы рассмотрим среды с четырьмя различными степенями развития связей.

Сначала (в §§ 15.4—15.7) мы рассмотрим «целое», в котором связи между частями фактически отсутствуют— предельный случай в ряду систем с постепенно уменьшающимся числом связей.

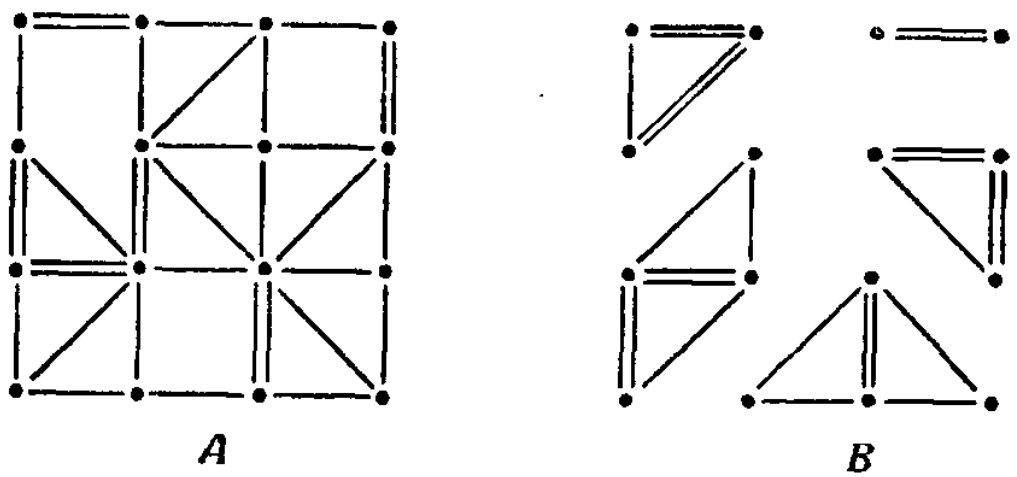
В §§ 15.8—15.11 мы рассмотрим случай, когда эффективные соединения существуют, но подсистемы связаны последовательно и между ними нет обратных связей. Этих двух случаев будет достаточно для того, чтобы выяснить некоторые основные вопросы.

В следующей главе мы исследуем более реальный случай, в котором направление соединений между системами ничем не ограничено, так что между ними есть обратные связи. Этот анализ мы разделим на два этапа: сначала, в §§ 16.2—16.4, мы рассмотрим систему с сильно развитыми связями, а затем, начиная с §16.5, будем исследовать самый интересный случай, в котором соединения возможны во всех направлениях (так что между

частями существуют обратные связи), но число соединений не так велико, т. е. целое образовано из подсистем с сильно развитыми внутренними связями, соединенных гораздо меньшим числом связей; это, в сущности, такой случай, когда нет ни большой насыщенности связями, ни полного разъединения.

Адаптация в итеративных системах

15.4. Первым подлежит рассмотрению тот случай, когда система, состоящая из организма и среды, фактически разделена на подсистемы, которые (по крайней мере в период наблюдения) совершенно не взаимодействуют друг с другом. Например, на фиг. 56 такая система



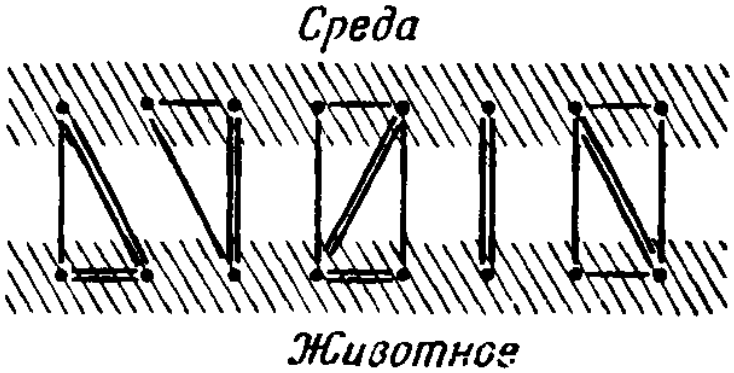
Фиг. 56.

представлена схемой *B*. (Для простоты стрелки на этой схеме заменены отрезками.) Если вся система состоит из организма и среды, то граница между этими двумя частями могла бы, например, проходить так, как показано на фиг. 57. Такую функциональную структуру имел бы любой организм, взаимодействующий со средой путем ряда независимых реакций. Мы будем говорить, что такое целое состоит из итеративных систем.

Примером рассуждений, применимых к такому целому, мог служить § 13.10. Если i — число подсистем, находящихся в данный момент в состоянии равновесия, то в итеративной системе i не может уменьшаться

и обычно будет возрастать. Каждая подсистема, достигшая равновесия, будет сохранять его, и, таким образом, целое будет шаг за шагом приближаться к общему равновесию.

15.5. Для системы, изображенной на фиг. 57, неважно, какого порядка (первого или второго — § 7.5) будут обратные связи: целое в любом случае неуклонно движется к равновесию. Например, если каждая подсистема содержит существенные переменные и ступенчатые



Фиг. 57. Схема взаимодействия животного, характеризуемого 8 переменными, со средой.

Переменные образуют пять независимых систем

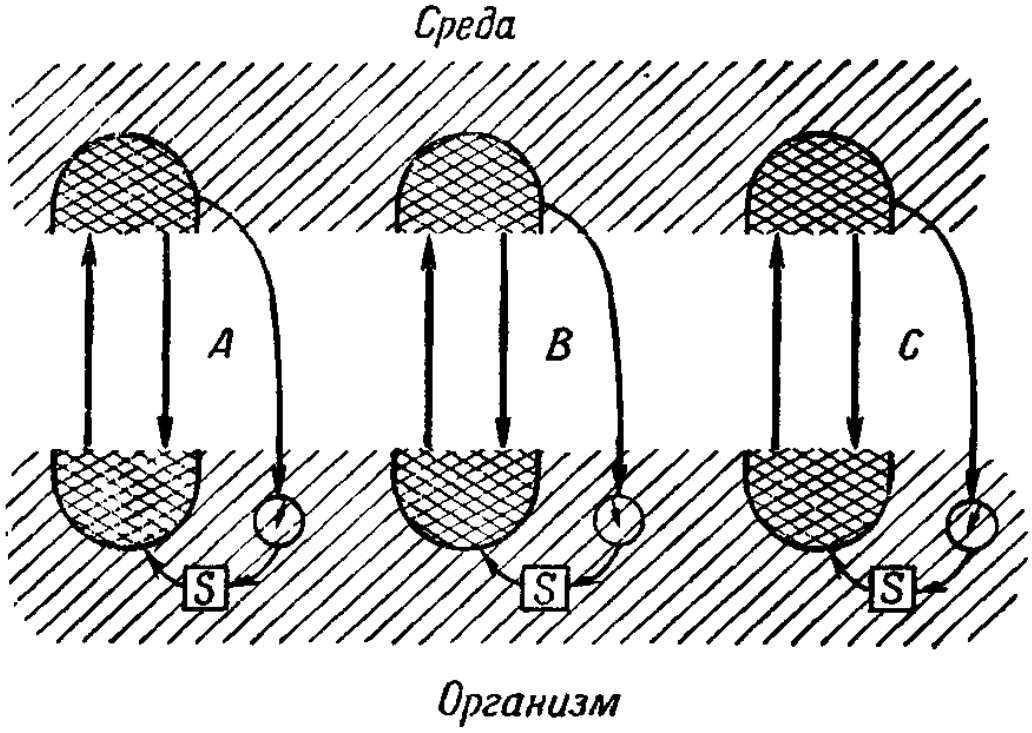
механизмы (как на фиг. 25), то возникнет стабильность второго порядка, как описано в § 7.23; поэтому *адаптация* целого к такой среде тоже будет кумулятивной и прогрессирующей.

В этом случае процессы научения путем проб и ошибок будут идти в одной подсистеме независимо от того, что́ происходит в других подсистемах. То, что такое независимое, «изолированное» научение может происходить у одного и того же животного, было показано Паркером в следующем опыте:

> «Если кормить актинию, приближая пищу к одной стороне ее рта, то она будет принимать кусочки пищи, один за другим, при помощи щупалец этой стороны. Если теперь чередовать куски пищи с кусочками фильтровальной бумаги, пропитанной мясным соком, актиния будет принимать то и другое без разбора в течение 8 или 10 проб, после чего она начнет брать только мясо,

а фильтровальную бумагу будет выбрасывать в окружающую морскую воду, не поднося ко рту. Если после выработки такой реакции на одной стороне рта перенести эксперимент на другую сторону, актиния снова будет принимать как фильтровальную бумагу, так и мясо до тех пор, пока и на этой стороне не выработается способность к различению».

15.6. Какое время необходимо для адаптации всей итеративной системы? Этому случаю соответствует T_s, а не T_1 (§ 11.5), так что здесь нельзя опасаться чрезмерной длительности. Таким образом, как бы велико ни



Фиг. 58. Упрощенный пример схемы непосредственных воздействий для организма, адаптирующегося к среде.

Переменные образуют три отдельные подсистемы (ср. фиг. 59 и 62).

было целое, если оно фактически состоит из итеративных подсистем, можно ожидать, что время его адаптации будет того же порядка, что и время адаптации одной из его подсистем. Если последнее достаточно коротко, то целое может иметь очень много частей и все же адаптироваться сравнительно быстро.

15.7. Если схему фиг. 57 перерисовать так, чтобы можно было ясно видеть ее отношение к системе, изображенной на фиг. 25, то получится схема, показанная на

фиг. 58 (где число подсистем для простоты уменьшено до трех).

Читателя может сразу поразить то, что три реагирующие части организма (находящиеся обычно в его мозгу) представлены так, как будто они не имеют никакой взаимной связи. Не будет ли это роковым недостатком схемы?

Этот вопрос подробнее рассмотрен в § 17.2; здесь можно дать лишь частичный ответ. Рассмотрим ход адаптации, во-первых, при полной разобщенности двух подсистем A и B (как они показаны на схеме) и, во-вторых, в том случае, когда реагирующая часть подсистемы A оказывает какое-то прямое действие на подсистему B.

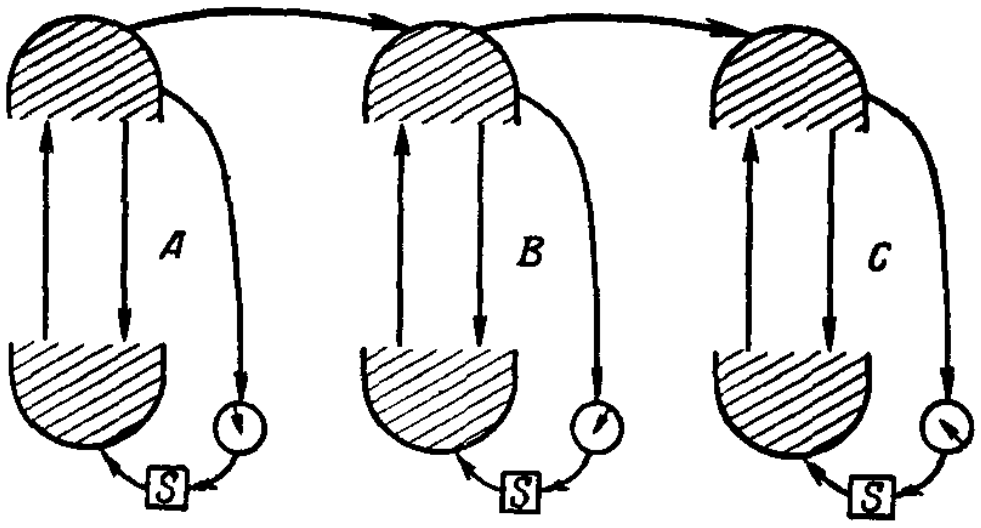
Первый случай очень прост: каждая подсистема представляет собой небольшую ультрастабильную систему, гомологичную описанной в § 7.5, и адаптация каждой из них будет идти обычным образом.

Но когда A влияет на B, весь процесс несколько меняется. На подсистему A ничто не воздействует, поэтому ее адаптация будет протекать по-прежнему; но подсистема B, бывшая ранее изолированной, подвержена теперь влиянию одного или нескольких параметров, которые могут и не быть постоянными. Влияние A на B будет зависеть от того, исходит ли оно от реагирующей части A или от ступенчатых механизмов A. Если оно исходит от ступенчатых механизмов, B не может достичь постоянной адаптации, пока ее не достигло A, так как значения ступенчатых функций будут продолжать изменяться. Однако как только ступенчатые функции придут к своим окончательным значениям, параметры для B будут постоянными и *тогда* уже B сможет начать эффективные поиски равновесия, которое не будет нарушаться никакими дальнейшими изменениями. Таким образом, связь, идущая от ступенчатых механизмов A, примерно удвоит время, необходимое для адаптации целого.

Если, однако, влияние на B исходит от реагирующей части подсистемы A, то даже после достижения адаптации A всякий раз, когда эта адаптация проявля-

ется (в виде надлежащей реакции на изменение среды, затрагивающее A), линии поведения реагирующей части A создадут изменяющуюся комбинацию значений параметров для B. Поэтому B окажется в условиях, аналогичных тем, в которых находился гомеостат в § 8.10, с той лишь разницей, что параметры для B могут иметь не два значения, а гораздо больше. Поэтому время адаптации B при *всех* этих значениях скорее всего будет приближаться к T_1 (§ 11.5), т. е. будет чрезмерно большим. Таким образом, связь, идущая от реагирующей части A к реагирующей части B, может привести к почти бесконечному отдалению момента адаптации целого.

Эти замечания, вероятно, достаточно убедительно показывают, что отсутствие связей между подсистемами организма на фиг. 58 не позволяет сразу отвергнуть эту импровизированную схему. Когда дело идет о соединении подсистем, не все удается увидеть с первого взгляда. (К этому вопросу мы вернемся в § 17.2.)



Фиг. 59.

Последовательная адаптация

15.8. Рассмотрим теперь следующую степень связанности внутри системы (§ 15.3) — последовательное соединение частей среды. Фиг. 59 иллюстрирует этот случай.

Еще не выяснив в точности, что́ здесь будет происходить, мы уже можем видеть, по аналогии с предыдущим параграфом, что адаптация должна наступать последовательно, сначала в подсистеме A, затем в B, затем в C. Таким образом, мы рассматриваем случай, когда организм встречается со средой, части которой находятся в таких взаимоотношениях, что к среде можно приспособиться только путем процесса, *учитывающего ее естественное расчленение.*

15.9. Такие формы среды весьма обычны. Щенок может научиться ловить кроликов только после того, как он научится бегать: среда не позволяет этим двум реакциям вырабатываться в обратном порядке. Таким путем протекает значительная часть процессов научения. Математика, например, слишком обширна и сложна, чтобы понять ее всю сразу, но ее можно освоить по этапам. Эти этапы находятся в естественном соподчинении, с которым нужно считаться, для того чтобы достичь успеха. Например, ученик может переходить от сложения к умножению (учитывая, что умножение есть последовательный ряд сложений) и т. д., но не от умножения к сложению и т. д. Наше современное знание математики фактически было достигнуто только благодаря тому, что в этой науке есть такого рода пути, ведущие от этапа к этапу.

Ясным примером такого процесса служит дрессировка сокола, описанная Ллойдом Морганом:

> «Его дрессируют с помощью приманки (мертвого голубя)... — сначала на поводке. Позже к поводку прикрепляют тонкий шнурок, и помощник снимает с сокола колпачок, в то время как сокольничий, стоя на расстоянии 5—10 ярдов, подзывает птицу криками и бросает приманку. Постепенно день ото дня расстояние увеличивают, пока сокол не начинает без колебаний подлетать ярдов с тридцати или около того; тогда его можно спускать на приманку без привязи, постепенно увеличивая расстояние, скажем, до тысячи ярдов. Когда это достигнуто, птица должна научиться

«падать» на приманку... Сначала она должна сделать это только один раз, а затем все больше и больше, пока она не будет «падать» на приманку и возвращаться обратно как угодно часто. После этого ее следует пускать на добычу...»

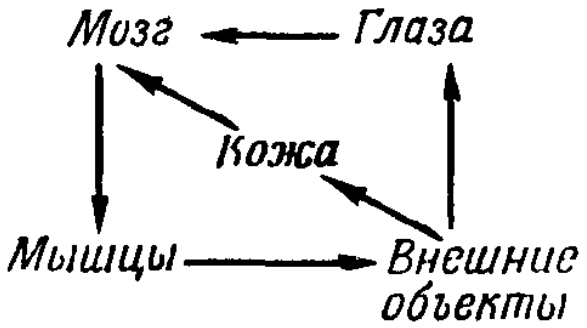
Тот же процесс был продемонстрирован в более «строгой» форме. Например, Вулф и Каулс приучили шимпанзе к тому, что определенные предметы можно обменивать на фрукты; после этого обезьяны научились открывать проблемные ящики, чтобы доставать эти предметы; но такой способ добывания фруктов («адаптивная» реакция) усваивался только в том случае, если до этого была хорошо усвоена процедура обмена. Иными словами, задача превышала адаптивную способность обезьян, если предъявлялась им как единое сложное целое, — они не могли получить фрукты, — но если знакомство со «средой» делилось на два этапа в определенной последовательности, то им удавалось к ней приспособиться.

«...Подрастающий ребенок день за днем, год за годом выковывает сложную цепь из приобретенных знаний и навыков, добавляя одно звено за другим в бесконечной последовательности», — говорит Каллер. Нужно ли еще раз подчеркивать всю важность последовательной адаптации?

15.10. Чтобы рассмотреть этот процесс подробнее, возьмем следующий пример. Молодое животное уже научилось передвигаться в окружающем мире, не сталкиваясь с другими предметами. (Хотя выработка этого навыка сама по себе сложна, она может служить для иллюстрации и к тому же сделает пример более ярким.) Этот процесс научения был обусловлен ультрастабильностью: он привел к такой комбинации значений ступенчатых функций, при которой поле системы, состоящей из глаз, мышц, кожных рецепторов, некоторых частей мозга и твердых внешних объектов, делает эту систему стабильной и способной всегда удерживать в известных пределах механические нагрузки и давления, создаваемые предметами, соприкасающимися с кожными рецеп-

торами (§ 5.4). Схема непосредственных воздействий для такой системы будет похожа на фиг. 60. Эту систему мы будем называть частью A, или «системой избегания».

Поскольку животное должно теперь самостоятельно питаться, в головном мозге должен выработаться такой комплекс значений ступенчатых функций, при котором возникнет поле, содержащее в качестве переменных мозг и источник пищи и стабильное в том отношении, что оно



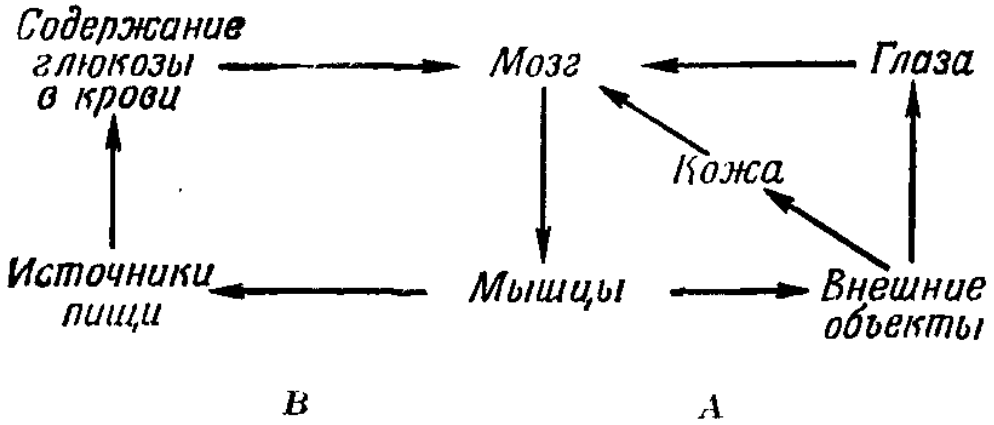
Фиг. 60. Схема непосредственных воздействий для «системы избегания».

Каждый элемент этой схемы соответствует большому числу переменных.

будет удерживать в нормальных пределах концентрацию глюкозы в крови. (Эту систему мы будем называть частью B, или «системой питания».) Выработка такой системы тоже будет обусловлена ультрастабильностью; но во время этого процесса две системы будут взаимодействовать.

Взаимодействие связано с тем, что животное, пытаясь путем проб и ошибок добыть себе пищу, будет многократно встречаться с твердыми предметами, с которыми оно могло бы столкнуться. Это взаимодействие весьма очевидно, когда собака преследует кролика в лесу. Кроме того, возможно, что процессы дисперсии в головном мозгу и в среде приведут к использованию общих переменных в той и другой реакции. При взаимодействии систем схема непосредственных воздействий будет похожа на фиг. 61.

Предположим теперь (просто для того, чтобы иметь ясный, легко анализируемый случай), что значения ступенчатых функций, влияющих на A, по какой-либо причине не могут изменяться, пока происходит адаптация в системе B (ср. § 10. 8). Поскольку «система избегания» A свободна от дальнейших изменений ступенчатых функций, ее поле не будет изменяться и она в любое время будет реагировать характерным для нее образом. Поэтому вся система эквивалентна ультрастабильной



Фиг. 61. Схема непосредственных воздействий для «системы питания».

системе B, взаимодействующей со «средой» A. Она была бы также эквивалентна ультрастабильной системе, сопоставляемой с врожденным рефлексом (§ 3.12), так как B будет изменять значения своих ступенчатых функций до тех пор, пока целое не будет иметь стабильного поля, удерживающего в заданных пределах переменную (концентрацию глюкозы в крови), сильные отклонения которой привели бы к изменению ступенчатых функций. Из § 8.11 мы знаем, что, каковы бы ни были особенности A, окончательное поле будет адаптировано *к ним*.

Следует заметить, что семь комплексов переменных, изображенных на фиг. 61, с анатомической и с функциональной точек зрения группируются весьма различным образом. С анатомической точки зрения мы видим пять групп, находящихся в теле животного, и две группы — во внешнем мире. С функциональной точки зрения

целое состоит из двух частей: «адаптирующейся» части B и части A, которая служит для нее «средой».

Теперь можно предсказать, как будет вести себя система после завершения описанных процессов. Поскольку часть A — «система избегания» — не изменилась, поведение целого по-прежнему будет препятствовать столкновениям, а реакции по отношению к источникам пищи будут поддерживать уровень глюкозы в крови в нормальных пределах. Но, кроме этого, поскольку B адаптировалось к A, добывание пищи будет видоизменено таким образом, что оно не будет сопровождаться столкновениями, так как все ведущие к ним варианты поведения теперь устранены.

15.11. Какое время потребуется для адаптации всех существенных переменных, когда элементы среды образуют такого рода цепь?

Доминирующая подсистема A, разумеется, будет идти к адаптации обычным путем. Однако подсистема B, даже после адаптации A, по-прежнему может быть в известной степени расстроена в результате изменений, исходящих от A — т. е. в конечном счете от тех влияющих на A возмущений, к которым эта подсистема (A) должна адаптироваться. Адаптация C тоже может быть нарушена некоторыми из этих возмущений, передающихся через B, и т. д. Таким образом, каждая из «нижележащих» подсистем цепи может быть расстроена в результате всех возмущений, которые достигают доминирующих над нею подсистем, а также вследствие реактивных, приспособительных изменений в этих доминирующих подсистемах.

Теперь нам ясно, какое значение имеет пропускная способность каналов связи, передающих возмущения вдоль по цепи. Если она высока, то к нижележащим звеньям цепи может передаваться столько возмущений, что адаптация этих звеньев будет задерживаться до бесконечности. Если она низка, то ослабление возмущений может быть таким быстрым, что подсистема C, хотя она и подвержена влиянию B, может практически не испытывать последствий того, что происходит в A;

следующая подсистема, D, может практически не испытывать влияния B, и т. д. Таким образом, по мере ослабления связей между подсистемами адаптация приближается к последовательной — сначала адаптируется A, затем B, затем C и т. д. (Пределом, конечно, является итеративная система.)

При последовательной адаптации поведение соответствует 2-му случаю, описанному в § 11.5. Время адаптации будет средним (T_2), а не чрезмерно большим (T_1).Таким образом, адаптация даже сложного организма в сложной среде может быть достигнута в относительно короткое время, если среда состоит из последовательно соединенных подсистем, каналы между которыми обладают лишь небольшой пропускной способностью.

Глава 16

АДАПТАЦИЯ В МУЛЬТИСТАБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

16.1. Продолжая исследование различных типов среды, мы рассмотрим, после фиг. 58 и 59, тот случай, когда подсистемы среды соединены без ограничения направления связей, так что между ними существуют и обратные связи. В пределах этого типа возможны различия в *числе* и видах связей, соединяющих между собой подсистемы. Особый интерес представляют два типовых случая:

1) среда с большим числом связей, близким к максимальному (нам удобнее будет рассмотреть этот случай первым, так как это не потребует много места);

2) среда с малым числом связей.

Среда с большим числом связей

16.2. Когда в некоторой совокупности подсистем число связей велико, каждая переменная в такой же степени подвержена влиянию переменных из других подсистем, как и из своей собственной. В этом случае разделение целого на подсистемы уже не имеет никакой естественной основы.

Таким образом, исследование среды с большим числом связей возвращает нас к случаю, рассмотренному в гл. 11.

16.3. Примеры обширных сред с большим числом связей довольно редки, так как наши земные условия обычно характеризуются большой расчлененностью (§ 15.2). Поэтому подобную среду мы интуитивно восприняли бы как что-то необычное или даже противоестественное,

Приводимые ниже примеры несколько надуманны, но они достаточно ясно покажут, чего следует ожидать в этом случае.

В § 11.9 мы уже упоминали «секретный» замок. Не будучи особенно динамичными, все его части, поскольку дело касается их влияния на выходную величину (подвижность языка в замке), связаны между собой в том смысле, что результат определяется их взаимоотношениями. Например, если в замке 7 дисков, позволяющих языку двигаться только при установке, образующей слово RHOMBUS, то влияние установки первого из них на букве R зависит от положения всех остальных шести дисков; так же обстоит дело со второй и последующими буквами.

Вторым примером может служить система уравнений, которую можно рассматривать как временную среду для профессионального вычислителя, если он получает плату просто за верный ответ. Иногда эти уравнения имеют простейший вид, например:

$$\left.\begin{aligned} 2x &= 8 \\ 3y &= -7 \\ {}^1/_2 z &= 3 \end{aligned}\right\}$$

Тогда они соответствуют итеративной форме среды: каждое уравнение можно решить без учета остальных уравнений (см. § 15.4).

Иногда система более сложна, например:

$$\left.\begin{aligned} 2x &= 3 \\ 3x - 2y &= 2 \\ x + y - z &= 0 \end{aligned}\right\}$$

Систему этого типа можно решать последовательно (см. § 15.8); сначала решить первое уравнение без учета двух других; затем, когда первое уравнение решено, можно решать второе без учета третьего и т. д. до конца. Особенность этой системы состоит в том, что величина x *не зависит* от коэффициентов второго и третьего уравнений.

Встречаются и более сложные системы, например:

$$\left.\begin{aligned} 2x+y-3z&=2\\ x-y+2z&=0\\ -x-3y+z&=1 \end{aligned}\right\}$$

Здесь величина x зависит от *всех* коэффициентов, и при отыскании x ни один коэффициент нельзя игнорировать. Так же обстоит дело с y и z. Если мы рассматриваем коэффициенты как среду, а величины x,y и z — как выходные величины, то для получения правильного решения необходимо, чтобы при отыскании значения любого из трех неизвестных учитывалась *вся* среда.

С третьим, более практическим примером среды с большим числом связей (теперь, к счастью, ушедшей в прошлое) встречался экспериментатор в ранний период применения катодно-лучевого осциллографа. Регулировка первых опытных моделей была делом весьма сложным. Попытка увеличить яркость светового пятна иногда приводила к тому, что пятно вовсе уходило за край экрана. При попытке вернуть пятно обратно изменялась скорость его перемещения и оно начинало колебаться в вертикальном направлении. Попытка исправить это приводила к смещению линии движения с горизонтали. И так далее. Переменные этой системы (яркость светового пятна, скорость его перемещения и т. д.) находились в многообразном и сложном динамическом сцеплении. Попытки регулировать систему путем изменения доступных параметров были трудны именно потому, что число связей между переменными было очень велико.

16.4. Сколько времени потребует адаптация ультрастабильной системы, включающей такую среду?

Этот вопрос рассматривался в § 11.2. Исключая тот вариант, когда случайно приемлема значительная часть результатов, время будет приближаться к T_1 (§ 11.5). По мере расширения системы время адаптации увеличивается, переходя все практически приемлемые границы; другими словами, адаптация ультрастабильной системы в этом случае, вероятно, невозможна. Но эта

неудача не дискредитирует ультрастабильную систему как модель головного мозга (§ 8.17), ибо такая среда часто ставит непосильную задачу и перед живым мозгом. Потому-то и можно положиться на «секретный» замок, что для живого организма адаптация к таким формам среды столь часто оказывается трудной или неосуществимой.

Даже тогда, когда квалифицированный вор справляется с секретным замком, он скорее подтверждает, чем опровергает это положение. Например, если он может услышать, в какой момент при движении каждого диска стопор оказывается против вырезки в диске, то среда становится для вора средой с последовательным соединением частей (§ 15.8): он может правильно установить первый диск, не обращая внимания на остальные, затем второй диск и т. д. Таким способом время отпирания замка неизмеримо сокращается. Значит, квалифицированный вор на самом деле вовсе не достигает успеха в адаптации к среде с большим числом связей: то, что является такой средой для других, для него лишь среда с последовательным соединением частей.

Таким образом, на вопрос «как ультрастабильная система или мозг адаптируется к среде с большим числом связей?» ответ будет — «никак». Но, показав обоснованность этого ответа, мы можем заметить, что иногда существуют способы, позволяющие в конце концов адаптироваться к среде, на первый взгляд слишком сложной для адаптации; иногда удается найти способы гораздо более быстрого проведения необходимых проб, а иногда — установить, что среда в действительности не так сложна, как она выглядит. (Этот вопрос рассмотрен во «Введении в кибернетику» § 13/4.)

Среда с малым числом связей

16.5. Наконец, мы рассмотрим случай, когда среда состоит из подсистем, соединенных таким образом, что они влияют друг на друга незначительно, или только

изредка, или только через другие подсистемы. В § 15.2 было высказано предположение, что это обычный случай почти во всех видах естественной земной среды.

Если степень взаимодействия между подсистемами варьирует, то нижним пределом этих вариаций будут итеративные системы, рассмотренные в § 15.4 (когда число связей между подсистемами падает до нуля), а верхним пределом — насыщенные связями системы, рассмотренные в § 16.2 (когда число связей достигает максимума).

Когда связи *между* подсистемами развиты значительно слабее, чем *внутри* подсистем, деление на подсистемы будет естественным и четким (§ 12.17).

Что произойдет, когда такая среда будет действовать внутри ультрастабильной системы? Будет ли происходить адаптация? Как покажет дальнейшее обсуждение, такие случаи столь многочисленны и формы их столь многообразны, что детальное и исчерпывающее описание их невозможно. Поэтому мы должны применить нашу основную стратегию (§ 2.17) — ясно обрисовать некоторые типовые формы, а затем охватить все остальные ссылкой на непрерывность: поскольку другие формы сходны с типовыми по своей структуре, они должны быть в сравнимой степени сходны с ними и в своем поведении.

16.6. Для того чтобы создать прочную основу для обсуждения этого наиболее важного случая, нужно ясно сформулировать исходные предположения.

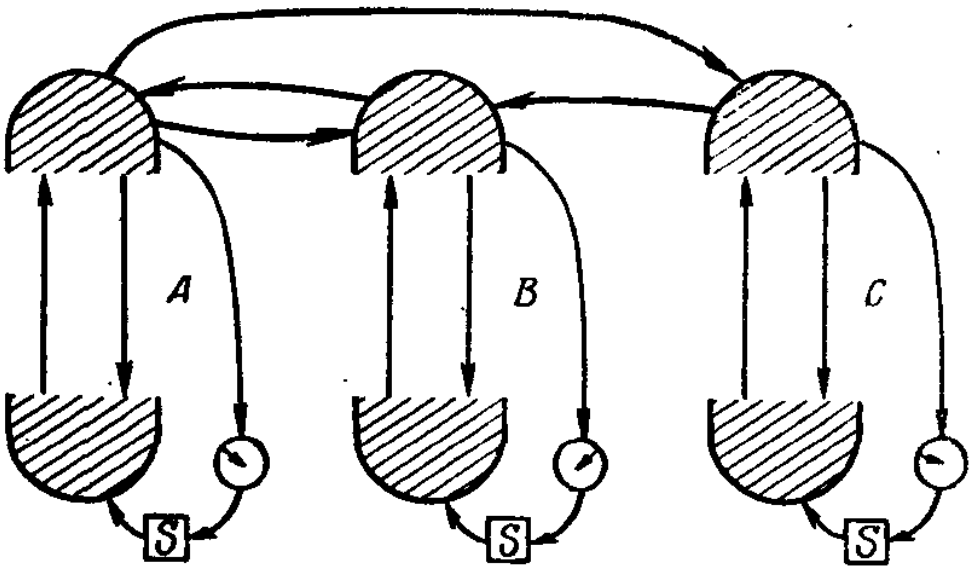
1. Предполагается, что среда соответствует описанной в § 15.2, т. е. состоит из большого числа подсистем, имеющих много состояний равновесия. Иными словами, среда полистабильна.

2. Предполагается, что взаимодействие подсистем незначительно — потому ли, что между ними мало первичных связей, или потому, что подсистемы часто находятся в равновесии.

3. Адаптация организма, связанного с этой средой, базируется на основном принципе ультрастабильности, т.е. на создании обратных связей второго порядка,

исключающих все равновесные состояния, кроме тех, при которых все существенные переменные остаются в надлежащих пределах.

4. Реагирующая часть организма сама разделена на подсистемы, между которыми нет прямой связи. Предполагается, что каждая подсистема имеет свои собственные существенные переменные и обратную связь второго порядка. Соответствующая схема изображена на фиг. 62, но она не дает полного представления о системе,



Фиг. 62.

так как в ней взяты только три подсистемы (ее следует сравнить с фиг. 58 и 59).

Такая система в основных чертах сходна с **мультистабильной** системой, определение которой дано в первом издании. (Описанная там система предоставляла бóльшую свободу связей между главными переменными, например связей одной реагирующей части с другой, и между реагирующей частью и подсистемой среды, отличной от той подсистемы, с которой эта часть преимущественно связана: эти второстепенные вариации нарушают ясность и не имеют большого значения; мы рассмотрим их в следующей главе.)

16.7. Для того чтобы проследить поведение мультистабильной системы, предположим, что мы наблюдаем две из ее подсистем, например A и B на фиг. 62, что их главные переменные имеют прямую связь между собой, т. е.

изменения каждой из них непосредственно влияют на другую, и что все остальные подсистемы по какой-то причине неактивны.

Прежде всего нужно отметить, что, поскольку остальные подсистемы неактивны, их присутствие можно игнорировать: они представляют собой как бы «фон», о котором говорилось в § 6.1. Даже если некоторые из них активны, их все же можно игнорировать, если две наблюдаемые подсистемы отделены от них барьером из неактивных подсистем (§ 12.10).

Далее, нужно отметить, что эти две подсистемы, рассматриваемые как некая единица, *образуют целое, обладающее ультрастабильностью*. Поэтому в таком целом будет совершаться обычная последовательность событий, ведущая к окончательному полю, и его поведение не будет существенно отличаться от поведения системы, представленной на фиг. 36. Если, однако, рассматривать эту же последовательность событий не как процесс, протекающий внутри одного ультрастабильного целого, а как взаимодействия между частью организма и частью среды, состоящими каждая из двух подсистем, то мы увидим формы поведения, гомологичные тем, которые наблюдаются при взаимодействии «организма» и среды. Другими словами, *внутри мультистабильной системы подсистема адаптируется к подсистеме точно таким же образом, как животное адаптируется к среде*. Мы увидим здесь тот же метод проб и ошибок, а когда процесс закончится, активность двух частей будет координирована таким образом, что существенные переменные двойной системы будут удерживаться в надлежащих пределах.

В точности тот же принцип управляет взаимодействием трех подсистем. Если все три непрерывно взаимодействуют, то они образуют одну ультрастабильную систему, обладающую обычными свойствами.

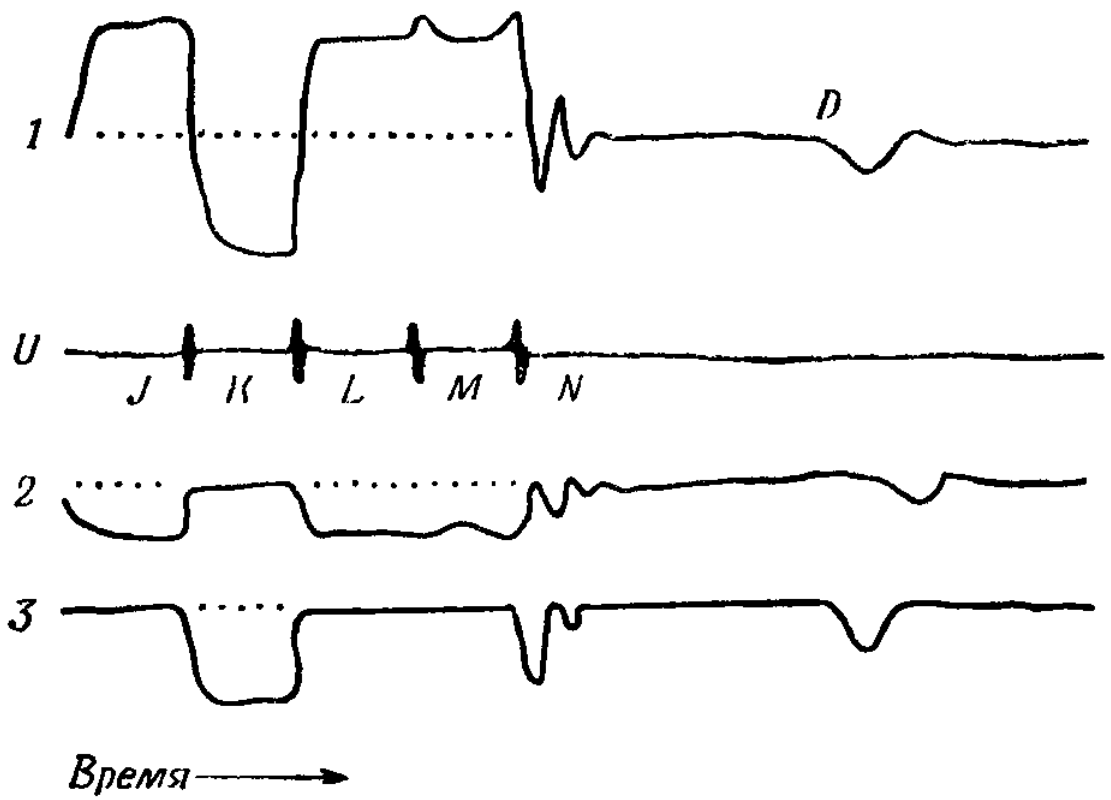
В качестве примера рассмотрим интересный случай, когда две из трех подсистем, скажем A и C, не имеющие никакой прямой связи между собой, соединены с промежуточной системой B связями, действующими с пере-

рывами и притом не одновременно. Предположим, что B взаимодействует сначала с A; благодаря их ультрастабильности эти подсистемы приходят к окончательному полю. Пусть затем взаимодействуют B и C. Если комбинация значений ступенчатых функций в подсистемах B и C дает стабильное поле для главных переменных B и C, то данная комбинация в подсистеме B будет в дальнейшем сохраняться: когда B снова соединится с A, восстановится первоначальное стабильное поле. Но если эта комбинация в подсистеме B при взаимодействии с C не дает стабильности, то она изменится. Следовательно, ступенчатые функции подсистемы B перестанут изменяться тогда и только тогда, когда они будут иметь значения, обеспечивающие стабильное поле при взаимодействии как с A, так и с C. (Нужно отметить принципиальную тождественность этого процесса с процессом, описанным в § 8.10.)

16.8. Рассмотренный случай можно проиллюстрировать с помощью гомеостата. Три блока были соединены так, что получилась схема непосредственных воздействий вида $2 \rightleftarrows 1 \rightleftarrows 3$ (2, 1 и 3 соответствуют A, B и C). Для разделения воздействий блоков 2 и 3 на блок 1 сосуды с водой в блоках 2 и 3 (см. фиг. 34) были перегорожены перекладинами таким образом, что их магниты могли смещаться только в направлении, соответствующем отклонению вниз на фиг. 63, тогда как блок 1 мог давать отклонения как вверх, так и вниз. Участки кривой *1*, расположенные выше средней линии (показанной пунктиром), соответствуют случаю, когда блоки 1 и 2 взаимодействовали, а блок 3 был независимым; участки той же кривой, расположенные ниже средней линии, соответствуют взаимодействию блоков 1 и 3 при независимости блока 2. Согласно установке, действие $1 \rightleftarrows 2$ было отрицательным, а $1 \rightleftarrows 3$ — положительным; действия $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 1$ управлялись униселектором.

После включения (J) блоки 1 и 2 образовали нестабильную систему, которая перешла через критическое состояние. Изменение положения униселектора (K) сделало систему блоков 1 и 2 стабильной, но система блоков

1 и 3 была еще нестабильной. Это привело к новой перестановке униселектора (L), и теперь система блоков 1 и 3 стала стабильной, но система блоков 1 и 2 снова стала нестабильной. Следующая перестановка (M) не устранила этого, но новое изменение (N) создало связи, сделавшие обе системы стабильными. Теперь значения ступенчатых функций установились окончательно; блок 1 может взаимодействовать как с блоком 2, так и с блоком 3 без потери стабильности.



Фиг. 63. Взаимодействие трех блоков гомеостата.

Перекладины, находящиеся в среднем положении, не позволяют магнитам блоков 2 и 3 двигаться в сторону, соответствующую отклонению кривой вверх. Вертикальные отклонения на линии U отмечают изменения положения униселектора блока 1. Смещение D, произведенное оператором, демонстрирует стабильность целого.

Мы уже говорили, что если A, B и C время от времени образуют тройную комбинацию, то ступенчатые функции всех трех частей перестанут изменяться тогда и только тогда, когда тройное сочетание их будет давать стабильное поле. Но мы можем пойти дальше. Если A, B и C будут в разное время соединяться различными способами — иногда попарно, иногда в тройной комбинации, а иногда будут оставаться независимыми,— то их ступенчатые функции перестанут изменяться тогда

и только тогда, когда они придут к комбинации значений, обеспечивающей стабильность при *всех* вариантах.

Очевидно, что такой ход рассуждений применим независимо от того, сколько систем взаимодействует и какие группы или сочетания они образуют при своем соединении. Мы всегда можем предсказать, что *их ступенчатые функции перестанут изменяться тогда и только тогда, когда все сочетания будут стабильны.* Ультрастабильные системы, будут ли они изолированы или соединены в более сложные мультистабильные системы, всегда действуют избирательно по отношению к тем значениям ступенчатых функций, которые обеспечивают стабильность.

16.9. В § 16.6 мы ради простоты допустили, что дисперсия отсутствует, так как мы предполагали, что две взаимодействующие подсистемы остаются одними и теми же (например, A и B на фиг. 62) в течение всего процесса. Какие видоизменения нужно внести, если учесть тот факт, что в мультистабильной системе число и распределение подсистем, активных в каждый данный момент, может меняться вследствие дисперсии?

Движение к равновесию целого, к окончательному полю и тем самым к адаптации целого будет происходить независимо от наличия или отсутствия дисперсии. Влияние дисперсии выражается в разрушении индивидуальности подсистем, рассмотренных в предыдущих параграфах. Там были описаны сложные процессы, протекающие в двух ультрастабильных подсистемах, главные переменные которых неоднократно проявляют активность, тогда как переменные окружающих подсистем остаются неактивными. Такое сохранение индивидуальности вряд ли возможно при наличии дисперсии. Предположим, например, что поле всех главных переменных мультистабильной системы стабильно и что ее репрезентативная точка находится в состоянии равновесия R. Если репрезентативную точку сместить в P, то линии, идущие от P, приведут ее обратно в R. Во время обратного движения точки из P в R различные

подсистемы будут то приходить в действие, поодиночке или в каких-либо сочетаниях, то переходить в неактивное состояние, создавая картину калейдоскопического разнообразия и кажущегося беспорядка. Движение к R по другой линии также будет приводить в действие различные комбинации подсистем: при этом совокупность подсистем, активированная во втором случае, может сильно отличаться от той, которая была активирована в первом случае.

При этих условиях уже нет смысла наблюдать поведение каких-то отдельных подсистем в процессе адаптации мультистабильной системы. До тех пор пока некоторые из существенных переменных находятся вне своих пределов, изменения в ступенчатых механизмах будут приводить в действие одно сочетание подсистем за другим. Но когда возникнет стабильное поле, не вызывающее изменений в ступенчатых механизмах, оно, как обычно, будет сохранено. Если мы теперь испытаем адаптацию мультистабильной системы путем смещения ее репрезентативной точки, то мы найдем, что реакция системы проявляется в разнообразной активности различных подсистем, координированной для достижения общей цели. Но, несмотря на такую координацию, в общем случае не будет существовать никакой простой связи между воздействиями одних подсистем на другие: зная, какие подсистемы были активированы на одной линии поведения и как они взаимодействовали, нельзя сказать ничего определенного о том, какие подсистемы будут активированы на какой-нибудь другой линии поведения или как они будут взаимодействовать.

Позже я снова буду говорить о «подсистеме A, адаптирующейся к подсистеме B» или «взаимодействующей с B», но это будет только словесная форма, удобная при описании: необходимо понять, что A и B могут быть нетождественны самим себе в разные моменты времени.

16.10. Эта новая картина отвечает на возражение, выдвигаемое против схемы, изображенной на фиг. 62 (и других схем), которое состоит в том, что видимую на этой схеме упорядоченность мы нигде не находим при

анатомическом и гистологическом исследовании организма (или при изучении среды). Это схемы непосредственных воздействий, предназначенные только для того, чтобы легче было представлять себе функциональные отношения, связанные с поведением. Нужно помнить, что в них показаны только *функциональные связи* и притом только между переменными, активными в какой-то малый промежуток времени. Фиг. 62 может ввести в заблуждение, так как наводит на мысль о постоянстве структуры, не существующем при наличии дисперсии, и о двухмерной пространственной форме, вполне вероятно, не имеющей никакого соответствия в анатомическом или гистологическом строении. Тем не менее эти функциональные отношения бесспорны, и схема отображает их. Какова их связь с переменными, которые могут быть физически идентифицированы в мозгу, еще предстоит выяснить.

16.11. Действие мультистабильной системы может показаться хаотичным, так как активность распределяется и перераспределяется среди подсистем в таком же видимом беспорядке, как в примере с дымящими трубами (§ 13.18), однако основная тенденция всегда направлена к конечному равновесию и адаптации. Поэтому следующим вопросом будет тот, который мы ставили в гл. 11: не потребует ли адаптация чрезмерно долгого времени?

Из сказанного в предыдущей главе очевидно, что многое будет зависеть от числа связей между подсистемами —от частоты и интенсивности возмущений, испытываемых каждой подсистемой со стороны других подсистем.

В предельном случае, когда передача возмущений повсюду равна нулю, вся система становится тождественной итеративным системам (§15.6) и целое будет идти к адаптации так же, как эти системы. В таком случае время адаптации будет сравнительно небольшим (T_3), а не чрезмерно длительным (T_1).

По мере увеличения «связанности» (вследствие большего числа основных связей или меньшего числа

состояний равновесия в подсистемах) система будет приближаться к типу систем с большим числом связей, описанному в § 16.4, а время адаптации будет соответственно возрастать, приближаясь к T_1.

Выводы. Теперь мы можем резюмировать данный в нескольких последних главах ответ на возражение, выдвинутое в § 11.2 и состоявшее в том, что ультрастабильность не может быть основным средством адаптации живых организмов, так как адаптация потребовала бы тогда слишком длительного времени. Теперь мы видим, что это возражение, по существу, основано на предположении о том, что организм и среда насыщены связями, как взаимными, так и внутренними. В § 15.2 были приведены данные о том, что *действительная* насыщенность связями отнюдь не так высока. Затем, в гл. 15 и 16, мы показали, что если она невысока, то для адаптации ультрастабильной системы уже не требуется чрезмерно долгое время. Таким образом, ответ на возражение, по крайней мере в общих чертах, найден.

На этом мы закончим обсуждение этого вопроса, так как более глубокое исследование потребовало бы количественных данных об адаптации мозга реальных организмов к реальным условиям. Такое исследование должно быть по силам современному экспериментатору.

Ретроградное торможение

16.12. Теперь мы выскажем следующее предположение: если систему, изображенную на фиг. 25, рассмотреть более внимательно в тех ее формах, какими она представлена в реальных организмах и реальных видах среды, то окажется, что она распадается на части, более сходные с частями мультистабильной системы (фиг. 62). Рассмотрим некоторые свойства мультистабильной системы, отличающие ее от ультрастабильных систем, представляющих собой лишь частную форму системы, изображенной на фиг. 25, и посмотрим, насколько они соответствуют тому, что известно о живых организмах

Первый вопрос относительно мультистабильной системы состоит в том, может ли она извлекать пользу из повторяющейся ситуации (эта проблема уже обсуждалась в гл. 10). Например, если мультистабильная система адаптировалась к величине параметра P_2, а затем к его величине P_8, то обнаружится ли при вторичном появлении P_2 хотя бы частичное сохранение первой адаптации?

Прежде чем попытаться дать ответ, вспомним, что во всякой полистабильной системе любые две линии поведения связаны с изменениями в двух группах переменных (§13.14), которые могут перекрывать или не перекрывать друг друга. Каждая группа распределена внутри системы примерно так, как дымящие трубы (§ 13.18) распределяются по территории города. Два возмущения (D_1 и D_2) в полистабильной системе создают две группы активных переменных, подобно тому как два ветра (W_1 и W_2) в городе дают две группы дымящих труб.

Какая часть всех труб города будет дымить при обоих ветрах? Точный ответ потребовал бы точного знания условий; но в качестве первого приближения можно сказать (см. § 13.15), что если лишь небольшая часть их дымит при W_1 и небольшая часть — при W_2, то в случае независимости этих двух групп доля труб, дымящих при обоих ветрах, будет выражаться произведением соответствующих двух дробей, т. е. будет значительно меньше каждой из них. Например, если 1% труб дымит при W_1 и 1% — при W_2, то при случайном распределении тех и других доля труб, дымящих при обоих ветрах, составит всего лишь 0,01%.

Независимость и связанная с ней малая «степень перекрывания» возможны лишь при значительном различии в направлении ветров W_1 и W_2. Если направление W_2 окажется очень близким к W_1, то W_2, вероятно, заставит дымить многие из труб группы «W_1» (разумеется, в предельном случае — при совпадении обоих направлений — W_2 заставит дымить все трубы группы «W_1»).

Таким образом, полистабильная система (при определенных условиях статистической независимости, которые потребовали бы детального исследования) будет реагировать на два значения параметра (на два возмущения, или раздражителя) изменением двух групп переменных, степень перекрывания которых зависит, во-первых, от «количества активации» при каждом значении параметра и, во-вторых, от близости этих значений.

Предположим теперь, что значения параметра соответствуют, как в § 10.8, видам среды, к которым нужно адаптироваться (или задачам, которые нужно решить). Поскольку мультистабильная система является также полистабильной, все только что сказанное относится и к мультистабильной системе. Здесь две линии поведения будут включать пробы и вызывать изменения не только в главных переменных, но и в ступенчатых механизмах. Степень взаимного перекрывания двух групп активированных ступенчатых механизмов тоже будет зависеть от того, какая часть всех этих механизмов активирована и насколько близки значения параметра (или формы среды). В частности, если линии поведения затрагивают лишь несколько общих ступенчатых механизмов, вторая группа проб может почти не вызвать изменений в ступенчатых механизмах, влияющих на первую реакцию, и, значит, почти не нарушит первой адаптации. Таким образом, *мультистабильная система* без каких-либо специальных видоизменений ad hoc, *обладает способностью извлекать пользу из повторяющихся ситуаций.*

16.13. Интересно отметить, что в том случае, когда два раздражителя (или два значения параметра) сильно различаются между собой, процессы активации в мультистабильной системе распределяются между двумя весьма различными группами ступенчатых механизмов. Таким образом в ней создается, без каких-либо специальных устройств, функциональный эквивалент «стрелочного» механизма *Г*, о котором говорилось в § 10.9.

16.14. Напротив, когда два возмущения (два раздражителя, или два значения параметра) сближаются между собой, степень перекрывания двух активируемых групп возрастает. Сильное перекрывание групп ступенчатых механизмов означает, что вторая серия проб в значительной мере разрушит первую адаптацию. Нарушение прежних приобретенных реакций в результате новых процессов научения хорошо известно в психологии; изучение таких фактов показывает, что детали их поразительно сходны с тем, чего следовало бы ожидать, если бы нервная система и окружающая ее среда были мультистабильными. В экспериментальной психологии давно установлено явление «ретроградного торможения». Фактические данные хорошо известны и слишком многочисленны, чтобы обсуждать их здесь, поэтому я просто приведу типичный пример. Мюллер и Пильцекер нашли, что если проверить усвоение выученного урока спустя полчаса, то окажется, что те, кто провел эти полчаса без дела, вспоминают 56% заученного, а те, кто заучивал в это время новый материал, вспоминают только 26%. Хилгард и Марквис на основании обзора данных приходят даже к выводу, что этот феномен достаточно универсален, чтобы возвести его в «принцип интерференции». Таким образом, не может быть сомнений в его широкой распространенности. Новое научение действительно разрушает старое.

В мультистабильной системе с увеличением сходства между раздражителями, использованными в новой и в прежней адаптации, усиливается тенденция новой адаптации разрушать старую; ибо, согласно нашему представлению о дисперсии, чем более сходны два раздражителя, тем больше вероятность того, что дисперсия приведет к активации общих переменных и общих ступенчатых механизмов. В психологических экспериментах неоднократно устанавливали, что большее сходство нового заучиваемого материала со старым приводит к более выраженной «интерференции». Например, Робинсон просил испытуемых заучивать четырехзначные

числа, потом выполнять второе задание, а затем вспоминать заученные ранее числа; он нашел, что наибольшая интерференция наблюдается в том случае, когда вторая задача состоит в заучивании новых четырехзначных чисел. Точно так же Скэггс установил, что испытуемого, которого просили запомнить расстановку пяти фигур на шахматной доске, память подводила особенно сильно в том случае, если он заучивал после этого другие расстановки такого рода. Таким образом, тенденция мультистабильной системы к дезорганизации под влиянием новых реакций совпадает с такой же тенденцией в нервной системе.

16.15. Нужно отметить, что требования, согласно которым модель мозга должна обнаруживать ретроградное торможение и в то же время иметь способность к накоплению адаптаций, противоположны друг другу: ретроградное торможение означает, что последующие адаптации *должны* вести к разрушению предшествовавших, а способность накоплять адаптации требует, чтобы более поздние из них *не приводили* к разрушению более ранних. Гомеостат обнаруживал ретроградное торможение в максимальной степени (§ 10.5), так как любая последующая адаптация уничтожала предыдущую полностью. Комплекс итеративных систем с каким-либо эффективным стрелочным механизмом обладает максимальной способностью к накоплению адаптаций. Мультистабильная система какого-то промежуточного типа обладает в той или иной степени обеими этими особенностями и тем самым сходна с живым организмом.

Глава 17

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

17.1. Исследуя явление адаптации, мы пришли к понятию ультрастабильной системы, а затем (см. § 11.2) встретились с некоторыми трудностями, касающимися времени, необходимого для адаптации такой системы. Эти трудности были в значительной части устранены, когда мы ввели представление о мультистабильной системе. (Это не значит, что проблема адаптации исчерпана, так как она включает бесчисленные частные случаи, заслуживающие особого исследования.) В этой и следующей главе мы рассмотрим ряд других возражений, выдвигаемых против нашего тезиса, согласно которому мозг представляет собой в основном мультистабильную систему. При этом мы столкнемся с некоторыми новыми сторонами проблемы, заслуживающими внимания.

Связи между частями мозга

17.2. Если мы отныне будем считать, что формулировка, данная в § 16.6, и приведенная на фиг. 62 схема (мультистабильной системы) решают, по крайней мере в основных чертах, задачу, поставленную в гл. 1, то возникает вопрос, почему на этой схеме, в нижней ее части (соответствующей организму), не показано никаких связей между подсистемами. Разве это отсутствие связей не искажает действительность? Подумать только — мозг, части которого никак не связаны между собой!

17.3. Мы должны раз и навсегда отбросить мысль, проводимую чуть ли не во всех книгах о головном мозге, написанных за последние сто лет, — мысль о том, что чем больше связей внутри головного мозга, тем лучше

Достаточно будет напомнить три линии рассуждений уже показавшие нам, что некоторые функции могут успешно осуществляться лишь тогда, когда члены определенных пар переменных не имеют возможности влиять друг на друга или это влияние ограниченно.

1) В § 8.15 мы видели, что в том случае, когда организм адаптируется путем дискретных проб, изменение значений ступенчатых функций под влиянием существенных переменных должно происходить со скоростью, значительно меньшей, чем скорость изменения главных переменных. Слишком быстрое изменение ступенчатых функций означало бы, что данные об адаптивности (или неадаптивности) некоторой комбинации их значений не успеют во время пробной реакции дойти через мозг и среду до существенных переменных, которые, таким образом, должны будут действовать еще до прибытия необходимой информации. Если для испытания пробной реакции требуется 10 *сек*, то изменения ступенчатых функций должны, очевидно, происходить не чаще, чем примерно с 11-секундными интервалами. И если необходимо 10 лет, чтобы должным образом оценить результаты глубокой реорганизации какой-либо гражданской службы, то такие реорганизации не следует проводить чаще, чем с 11-летними промежутками. Таким образом, связи, идущие от существенных переменных к ступенчатым функциям, могут становиться вредными, если они чрезмерно развиты.

2) В гл. 10 мы исследовали, как организм мог бы извлекать пользу из повторяющейся ситуации, т. е., адаптировавшись сначала к A, а затем к B, мог бы при вторичном появлении A сразу вести себя соответствующим образом. В § 10.8 было показано, что во время адаптации к B ступенчатые механизмы, участвующие в адаптации к A, *не должны* подвергаться влиянию изменений, происходящих с существенными переменными. Связи, допускающие такое влияние, приносили бы вред.

3) В § 16.11 было показано, что шансы мультистабильной системы на достижение адаптации в достаточно короткое время находятся в тесной зависимости от приб-

лижения такой системы к итеративной форме. Таким образом, каждое добавление новых каналов связи, удаляя систему от итеративной формы, помимо всего прочего, удлиняет время, необходимое для адаптации.

Итак, *бывают случаи, когда увеличение числа связей в адаптирующихся системах может быть вредным.*

17.4. Можно все-таки возразить, что на фиг. 62 следовало бы показать связи, идущие непосредственно от одной реагирующей части к другой, поскольку такие связи необходимы для достижения координации между частями. Это возражение в сущности ошибочно; как мы сейчас увидим, связи не являются *необходимыми*.

Прежде всего мы можем исключить тот случай, когда части среды (как на фиг. 58) не связаны между собой: ведь тогда угрозы для различных существенных переменных приходят независимо, и реакции на них могут быть независимыми. В этом случае необходимость координации между частями не возникает.

А как быть со случаем, представленным на фиг. 62, где части среды *связаны* и поведение, скажем, реагирующей части A может через посредство части B среды влиять на поведение второй существенной переменной (B)? В этом случае координация действий двух реагирующих частей, несомненно, необходима, так как желательного состояния, при котором *все* существенные переменные удерживаются в нормальных пределах, можно достичь только при надлежащем соотношении действий каждой части с действиями остальных частей; ибо все действия происходят в общей среде.

Итак, координация между реагирующими частями необходима, но значит ли это, что реагирующие части должны быть непосредственно связаны друг с другом? Отнюдь нет — ибо между ними (в рассматриваемом случае) уже существует связь *через среду*.

Анатому простительно думать, что связь между частями мозга возможна только через какие-либо тракты или нервные волокна, выявляемые методами анатомии или гистологии. Однако тот, кто изучает функцию, знает, что могут быть также каналы, проходящие через

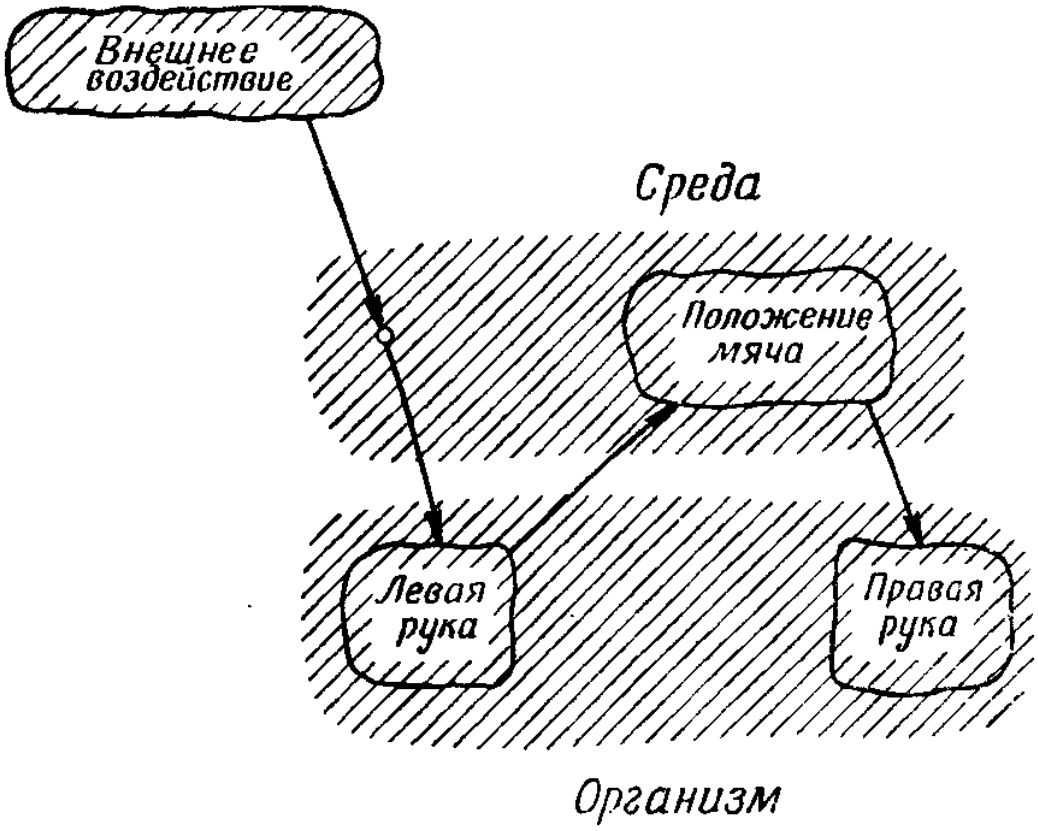
внешнюю среду. Элементарный пример — центральная регуляция работы голосовых связок при помощи обратной связи, которая, прежде чем достичь мозга, проходит (по крайней мере частично) через окружающий воздух.

Поскольку этот вопрос имеет существенное значение для общей теории взаимодействия организма со средой и поскольку мы до сих пор уделяли ему мало внимания (хотя и коснулись его в § 5.13), мы рассмотрим пример, показывающий, каким образом действия реагирующих частей мозга могут иногда координироваться с помощью канала связи, проходящего через среду.

Представьте себе игрока в теннис, подающего мяч. Сначала движется его левая рука, подбрасывающая мяч в воздух; в следующее мгновение делает движение его правая рука, которая, как мы будем предполагать, правильно посылает мяч на другую половину корта. Мы предположим также, что движения левой руки (безразлично, по какой причине) не вполне одинаковы, а случайным образом слегка изменяются от подачи к подаче, причем эти изменения не слишком малы, так что без соответствующих изменений в движении правой руку мяч легко мог бы выйти за пределы корта. Тем не менее мы предполагаем, что движения правой руки *действительно* так согласуются с вариациями в движениях левой, что мяч благополучно попадает в назначенное место («конечный пункт движения мяча» — существенная переменная, нормальными пределами которой служат границы противоположной половины корта). Для координации *необходимо* существование какого-то канала от источника вариаций в движении левой руки к движениям правой руки («Введение в кибернетику», § 11/11; необходимость этой связи следует также из § 4.13 настоящей книги). Теперь возникает такой вопрос: должен ли этот канал целиком находиться внутри мозга?

Ответ: не только не должен, но обычно и не находится там. Это покажут следующие рассуждения. Рассмотрим ситуацию в тот момент, когда мяч подброшен вверх. Регулируется ли начинающееся движение правой руки информацией, исходящей из двигательного центра левой

руки[1] или от положения мяча в воздухе? Решающий ответ даст следующее рассуждение (§§ 4.12 и 12.3). Пусть движения левой руки остались прежними, но предположим, что теперь изменилось положение мяча, скажем, под влиянием порыва ветра; изменится ли движение правой руки? Нормальный игрок в этом случае тотчас



Фиг. 64.

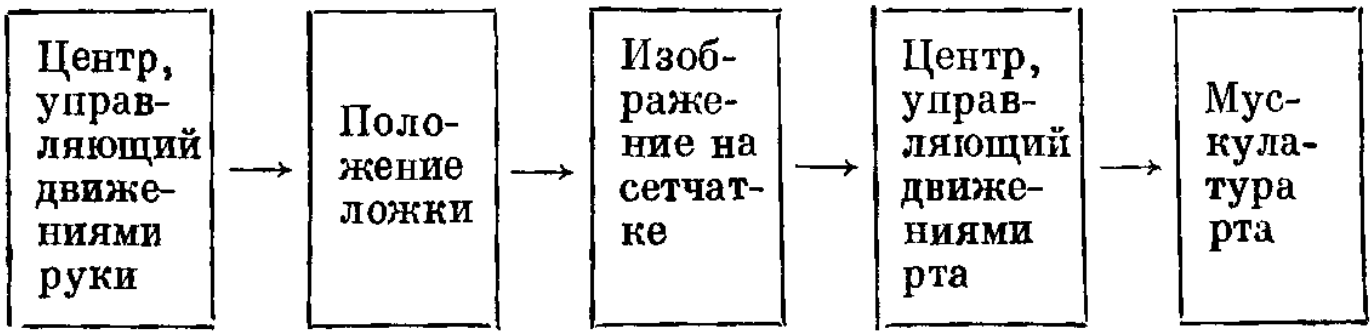
же соответственно изменит движения правой руки. Это видоизменение, согласно принятому нами правилу рассуждения, показывает, что правая рука, по крайней мере отчасти, находится под прямым влиянием положения мяча в воздухе. Таким образом, теннисист, подающий мяч, обычно координирует движения обеих рук следующим методом. Левая рука подбрасывает мяч не вполне точно, а затем положение мяча в воздухе (через зрение) направляет движения правой руки. Схема непосредственных воздействий для этого случая приведена на фиг. 64 (чтобы показать соответствие ее схеме, изображенной на фиг. 62).

[1] Во избежание путаницы напомним, что двигательный центр правой руки расположен в левом полушарии головного мозга, и наоборот.

Итак, при сделанных нами в этом примере предположениях, *координация между реагирующими частями может происходить через посредство среды; связь внутри нервной системы не всегда необходима.*

17.5. После всего сказанного вообще можно начать удивляться, почему в мозге существуют связи между отдельными частями. Однако они должны существовать по меньшей мере по двум причинам.

Первая из них связана с тем, что организм, всю жизнь старающийся охранять свои существенные переменные от сдвигов, приобретает важнейшее преимущество, если может получать сведения об угрожающем сдвиге заранее. (Этот факт можно либо принять как нечто очевидное, либо доказать более формальным путем, как это сделано во «Введении в кибернетику», §12/5). Многие из возмущений, угрожающих существенным переменным, исходят в конечном счете от внешней среды, но некоторые из них могут исходить от других частей самого организма. Например, каждый ребенок, который учится самостоятельно есть, обнаруживает, что боль в губах могут вызвать как внешние предметы, так и его собственные попытки ввести ложку с пищей в закрытый рот. Для того чтобы губы не пострадали, рот нужно открыть еще до приближения к нему ложки, а для этого информация о приближающейся ложке должна дойти до «центра рта» раньше, чем ложка подойдет ко рту. Иногда информация может прийти через внешнюю среду (когда ребенок смотрит на ложку), согласно следующей схеме непосредственных воздействий:



Но если по какой-либо причине передача информации от руки ко рту через внешнюю среду невозможна, то

тогда связь, проходящая внутри мозга от «центра руки» к «центру рта», *необходима*, чтобы рот мог открыться до прибытия ложки. Таким образом, очевидно, что связь внутри мозга может быть необходимой или полезной.

17.6. Вторая причина, по которой связи между частями мозга могут быть желательными, будет обрисована здесь лишь вкратце, так как для ее строгого рассмотрения требуется знакомство с понятиями, введенными в §7/7 «Введения в кибернетику».

Описывая систему, начинают с того, что относят ее к какому-либо обширному классу возможных форм; по мере добавления дальнейших спецификаций класс, к которому она может принадлежать, все суживается. Начнем с системы, свойства которой ограничены лишь тем, что она имеет определенное число возможных состояний. Если теперь добавить еще одну спецификацию— «схема непосредственных воздействий этой системы содержит все возможные стрелки», — то это лишь незначительно ограничит возможные формы ее полей. Но если бы было сказано, что схема содержит *мало* стрелок, возможные формы полей были бы ограничены очень резко.

Таким образом, при прочих равных условиях, чем меньше связей в системе, тем меньше у нее возможных форм поведения. С этой точки зрения добавочные связи в мозге могут быть полезны, так как *они позволяют увеличить число возможных форм поведения.*

В этом можно также убедиться, рассматривая реагирующие части до образования связи между ними. Параметры, используемые при соединении, должны были до образования связи иметь постоянные величины (так как иначе эти части не были бы системами, определяемыми состоянием). Значит, до образования связи между частями каждый параметр должен быть фиксирован на какой-то *одной* из его возможных величин; после образования связи параметр получил бы возможность изменяться, так как на него могла бы влиять другая часть. С изменчивостью параметра часть получила бы соответствующее разнообразие возможных полей и форм

поведения (§ 6.3). Таким образом, при соединении частей мобилизуются параметры, которые в противном случае были бы фиксированы, что расширяет многообразие возможных видов поведения.

Теперь мы можем признать, не боясь недоразумений, что схема, приведенная на фиг. 62, была бы ближе к действительности, если бы содержала связи между реагирующими частями. Однако без них изложение §16.6 было проще.

17.7. Итак увеличение числа связей между реагирующими частями в организме дает два только что описанных преимущества; но вместе с тем, как показано в § 16.4, оно удлиняет — часто в огромной степени — время, необходимое для адаптации. Несомненно, есть и другие факторы, которые нужно учитывать в общем балансе, но и то, что мы уже видели, ясно показывает, что *обилие связей между частями мозга несет с собой как преимущества, так и невыгоды*. Очевидно, организм должен развиваться так, чтобы его мозг пришел в этом отношении к некоторому оптимуму.

Я не хочу сказать, что здесь требуется оптимум в строгом смысле слова. Нахождение оптимума — операция значительно более сложная, чем нахождение приемлемой (согласно данному критерию) величины. Предположим, например, что иностранец пришел на рынок, где продается сто разных сортов фруктов, совершенно незнакомых ему. Чтобы найти *оптимум* для своего вкуса, он должен: 1) попробовать все сто сортов, 2) произвести не менее 99 сравнений и 3) запомнить результаты, чтобы можно было в конце концов вернуться к оптимальному варианту. Вместе с тем, чтобы найти приемлемый для него род фруктов, он должен просто пробовать их по порядку или в случайной последовательности (не заботясь о том, чтобы запоминать результаты) и остановиться на первом, который его удовлетворит. Таким образом, требование найти оптимум может быть излишним; в биологических системах достаточно того, чтобы организм находил состояния или величины, лежащие в *заданных пределах*,

Итак, для того чтобы организм с известным успехом адаптировался к земной среде, необходимо, чтобы степень развития связей между реагирующими частями лежала в определенных пределах.

Вспомогательные регуляторные механизмы

17.8. «В определенных пределах» — мы слышали это выражение раньше! Не попадаем ли мы таким образом в замкнутый круг? Отнюдь нет, ибо речь идет о двух различных видах адаптации, о двух ее типах, уровнях или порядках.

Для того чтобы увидеть, каковы эти два вида адаптаций и их взаимоотношения, вспомним, что мы начали (§ 3.14) с предположения о том, что определенные существенные переменные должны удерживаться в известных пределах. Назовем эти переменные E_1, E_2, E_3 и E_4; их можно ясно видеть на фиг. 33. Удерживание *их* в определенных пределах — это один вид адаптации. В гл. 11 мы добавили еще одну существенную переменную F — *время*, необходимое для того, чтобы четыре переменные E приобрели стабильность внутри своих пределов; ограничение времени известными пределами — это второй вид адаптации. Эта переменная F совершенно отлична от пятой переменной E и входит в систему совершенно иным способом. Тем не менее F все-таки входит в целое как существенная переменная, ибо, начиная § 11.2, мы последовательно обсуждали случай, в котором она имеет известные пределы, соответствующие требованиям нашей проблемы. (Возможность существования различных классов существенных переменных упоминалась в § 3.15.)

Очевидно, что все E — например, четыре реле гомеостата — гомологичны и эквивалентны. Время же входит в целое совершенно по-иному. Чтобы увидеть, как именно «по-иному», предположим, что весьма желательно (для какой-то самой важной существенной переменной $\mathcal{E}$), чтобы успех в отношении менее важной

существенной переменной E был достигнут менее чем за 100 проб (т. е. F должно быть меньше 100). Величина E во время связанных с ней проб будет вызывать одно за другим изменения в соответствующих ей ступенчатых механизмах; в то же самое время F (положим, это будет возрастающее утомление) неуклонно приближается к своему пределу. Что произойдет, если F превысит предельную величину 100? Если $\mathcal{E}$ таково, что организм должен погибнуть, то этим дело и кончится; но если $\mathcal{E}$ не решает вопроса жизни и смерти, то окажется, что организм просто произвел много проб каким-то способом, который не смог быстро привести к успеху (ситуация, обсуждавшаяся в гл. 11). Что теперь делать? Согласно методу ультрастабильности, переход величины F за ее предел должен вызвать определенные изменения, но ясно, что это не будут просто изменения в тех же ступенчатых механизмах, с которыми «работала» переменная E, иначе действие F ничем не отличалось бы от 101-й пробы той же серии. Для того чтобы действие переменной F было достаточно эффективным, переход ею предела должен вызвать изменения тех условий, которые оставались *неизменными* на протяжении всех 100 проб с переменными E. Пробы с E не должны состоять из новых вариантов, относящихся к тому же классу форм поведения: эти формы должны смениться действиями, принадлежащими к другому классу. Например, если кошка в ящике сделает 100 безуспешных попыток нажимать рычаги или трогать другие объекты, то ей придет пора начать пробы, принадлежащие к новой статистической популяции, — быть может, перейти к различным формам мяуканья.

Таким образом, ускорение адаптации переменной E путем выбора подходящего значения ступенчатых функций, находящихся под контролем F,— это не то же самое, что выбор значений ступенчатых функций, который производился бы под контролем самой переменной E. Предоставить сдающему экзамен студенту перо, бумагу и тихую комнату — значит оказать ему «помощь», но ясно, что эта помощь совершенно отлична от «помощи»,

которая состояла бы в том, чтобы рассказать ему, как нужно ответить на определенный вопрос. F «помогает» E только в первом смысле, но не во втором.

Следовательно, сделанный в § 17.7 вывод, что для достаточно быстрой адаптации организма определенные параметры должны быть введены в известные пределы, не оставляет нас в замкнутом круге, так как два выбора величин совершаются на разных уровнях, т. е. относятся к разным группам параметров.

17.9. Мы отнюдь не предполагаем, что у всех встречающихся в природе организмов существенные переменные четко делятся на различные «уровни» — E, F и т. д. Если бы это было так! В подобных случаях весь процесс адаптации (идущий в действительности на протяжении всей жизни, как мы видели в § 10.2) можно разделить на части, что позволяет исследователю изучать систему часть за частью, уровень за уровнем, неизмеримо упрощая его работу. Конструкция гомеостата была рассчитана отчасти на то, чтобы сделать ясно различимыми два уровня: 1) четыре непрерывно изменяющиеся переменные, связанные с магнитами, и 2) скачкообразно изменяющиеся переменные, относящиеся к униселекторам. Когда система *обладает* таким естественным внутренним расчленением, наблюдатель может воспользоваться этим и разбить описание довольно сложного целого на три этапа, каждый из которых значительно проще описания системы в целом: описание «непрерывной» системы и ее свойств, «скачкообразной» системы и *ее* свойств и, наконец, взаимодействия между ними. Но когда вся система не поддается такому разделению, остается одно лишь до крайности сложное целое, не сводимое к более простым элементам и поэтому столь же неудобоваримое для ученого, как примеры, приведенные в § 16.3.

В этой книге неизбежно приходится иметь дело с тем случаем, когда существенные переменные четко делятся на два уровня: первичные уровни E_1, E_2, E_3, E_4 (в гл. 7—10) и затем резко обособленный уровень F, который мы рассматривали, начиная с гл. 11. В этом мы опять следовали нашей основной стратегии (§ 2.17)—

стремились хорошо понять более простые случаи, с тем чтобы использовать их в качестве основы для составления хотя бы общего представления о том, что́ не поддается анализу. Теперь читатель может видеть, что простота предшествующих глав была в сущности дидактическим приемом —она никак не отражает действительную сложность реальных организмов. На самом деле сложность их на много порядков больше, чем сложность рассмотренных нами систем. Например, реагирующая часть *R* на фиг. 25, которая кажется столь простой, может не только достигать сложности мультистабильной системы (см. фиг. 62), но у высших организмов может также сама состоять из множества подсистем типа фиг. 25 с их собственными «малыми» существенными переменными и адаптациями низшего порядка; ибо адаптация к отдаленным целям в значительной части достигается путем отыскания соответствующих комплексов промежуточных целей, нередко образующих сложную временну́ю и логическую последовательность. Таким образом, используя максимально упрощенные схемы фиг. 25 и 62 для ясного усвоения основ, мы не должны забывать, что в реальном мозге те же принципы действуют на несравненно более высоком уровне сложности, который, вполне возможно, никогда не удастся охватить *в деталях* одному человеку, ибо предел индекса умственных способностей лежит ниже 200.

Признав это, продолжим изучение тех случаев, в которых возможно какое-то деление на уровни и в которых мы можем хотя бы частично разобраться.

17.10. В гл. 7 было показано, что простая ультрастабильная система способна решать основную проблему— удерживать первичные существенные переменные в их пределах. Но в гл. 11 мы выяснили, что в некоторых случаях адаптация, хотя она в чисто логическом смысле и совершается, происходит с такой малой эффективностью, что оказывается бесполезной для практических целей. Чтобы найти механизм, сходный с живым, особенно человеческим, мозгом, мы должны найти такую его форму, которая адаптируется не только номинально,

но и с высокой эффективностью. В § 17.7 мы установили, что для этого нужно, чтобы степень развития внутримозговых связей лежала в известных пределах.

Теперь мы можем указать и другие параметры, которые тоже должны быть соответственно подобраны, чтобы адаптация не была чисто номинальной. О некоторых из них мы уже попутно упоминали:

1) В § 8.15 мы отметили, что *длительность пробы* не должна быть слишком большой или слишком малой. В описанном там случае ее, конечно, устанавливал оператор, перед тем как регистрировать поведение гомеостата; но еще ничего не было сказано о том, каким образом выбор ее мог бы производиться *автоматически* в организме.

2) В § 7.7 говорилось, что существенные переменные должны действовать на значения ступенчатых функций определенным образом — заставлять их изменяться при «плохом» результате и прекращать изменение при «хорошем». Но ничего не было сказано о том, как такая зависимость должна создаваться в организме.

3) В § 10.8 было показано, что для эффективного приспособления ультрастабильной системы к повторяющейся ситуации необходим какой-то *стрелочный механизм*; но ничего не говорилось о том, как организм мог бы приобрести его.

4) В § 13.11 мы показали, насколько важна величина такого параметра как «доля состояний равновесия от числа всех состояний частей системы». Но ничего не было сказано о том, как можно добиться того, чтобы этот параметр оставался в требуемых пределах.

Несомненно, есть и другие параметры, о которых мы еще не упоминали. Один из них, выдающийся по своему значению, нужно рассмотреть в особом разделе.

Распределение обратных связей

17.11. Существует еще одно соотношение, необходимое для того, чтобы адаптация не была только номинальной; оно, собственно, следует из фиг. 62, где этот важный

момент был принят без доказательства. Если мы начнем рассмотрение этой схемы со среды — от части ее, принадлежащей любой из подсистем,— и проследим путь связей через существенную переменную, на которую она влияет, далее через соответствующий ступенчатый механизм, реагирующую часть и, наконец, обратно к среде, то мы придем к той же подсистеме, с которой начали. Таким образом, фиг. 62 указывает на то, что если существенная переменная, скажем E_1, испытывает возмущающее действие какой-то части среды, то реакции со стороны E_1 в конце концов затронут ту часть среды, которая служит причиной «беспокойства».

Такое соответствие несомненно способствует эффективности адаптации, в чем можно убедиться, внимательно рассмотрев, каким было бы поведение системы в противном случае. (Это яснее всего видно в случае итеративных систем; см. фиг. 58.) Предположим, что здесь обратные связи второго порядка были бы разорваны, а затем воссоединились каким-либо случайным образом, так что существенная переменная подсистемы A влияла бы, скажем, на реагирующую часть подсистемы B. Любое возмущение подсистемы A, к которому эта система не адаптирована, привело бы теперь к изменению значений ступенчатых функций подсистемы B, хотя прежняя комбинация их значений, возможно, была в совершенстве приспособлена для реакций на любые возмущения B. Ясно, что без надлежащего распределения обратных связей второго порядка эффекты, вызываемые изменением существенных переменных, изменялись бы лишь случайным образом, разрушая при этом уже достигнутые частные адаптации. Таким образом, было бы невозможным то накопление эффективных адаптаций в подсистемах и неуклонное приближение к общей адаптации, которому мы придавали первостепенное значение в гл. 10. Система и в этом случае адаптировалась бы так, как адаптируется гомеостат, но для этого требовалось бы чрезмерно долгое время T_1, а не сравнительно короткое T_s (§ 11.5).

Распределение обратных связей не может быть установлено раз и навсегда, так как часть каждой замкнутой цепи находится в среде или определяется ею и поэтому подвержена изменениям. Для того чтобы распределение связей оставалось целесообразным, организм должен отвечать на эти изменения «компенсирующими» изменениями.

Для иллюстрации приведем хорошо известный пример, показывающий, что в некоторых случаях действительно необходимо определить, *где* именно нужно внести поправку. Стремящийся к успеху шахматист только что проиграл партию и размышляет над тем, каким образом следует изменить стратегию на будущее. Часто он сознает, что не уверен в том, *где* должна быть внесена поправка. Быть может, нужно проанализировать последние несколько ходов и изменить тактику? Или в будущем избегать миттельшпилей такого типа? Или, наконец, отказаться от первого хода d2—d4 и начинать с хода e2—e4? Молодой шахматист должен решать вопрос не только об очередных ходах, но и о том, где вносить поправки, вытекающие из результатов. Таким образом, вполне возможно, что слабая игра некоторых шахматистов объясняется только тем, что после проигрыша партии они изменяют дебют, когда следовало бы изменить тактику в эндшпиле.

(В этом примере «части», которые следует видоизменить, распределены во времени: для вносимого изменения нужно найти надлежащее место в временно́й последовательности. Пример напоминает нам, что схема непосредственных воздействий (например, фиг. 62) отображает *функциональные*, а не структурные или анатомические отношения.)

17.12. Последние два раздела показали, что для достаточной эффективности и быстроты адаптации, совершающейся на основе принципа ультрастабильности, требуются по меньшей мере пять вспомогательных регуляторных механизмов. Поэтому следующий вопрос таков: каким образом могли бы появиться эти вспомогательные регуляторные механизмы?

17.13. Ответ можно дать с некоторой долей уверенности, так как все процессы регулирования подчиняются закону необходимого разнообразия. (Он описан в гл. 11 «Введения в кибернетику»; здесь будут приведены лишь необходимые детали.)

Этот закон (частный случай которого представляет 10-я теорема Шеннона, относящаяся к подавлению шумов) гласит, что если регулятор ограждает какие-то существенные переменные от влияния известного *количества* внешних воздействий, то этот регулятор должен быть способен осуществлять по меньшей мере такое же количество выбора. (Если бы этот закон оказался нарушенным, мы могли бы встретиться с появлением надлежащих следствий без надлежащих причин, как если бы, например, экзаменуемый давал правильные ответы, еще не получив вопросов (§ 7. 8). Ученые исходят из предположения, что таких вещей не бывает, и до сих пор они не нашли ни одного факта, который заставил бы их усомниться в этом.) Таким образом, существование вспомогательных регуляторных механизмов требует, чтобы существовал достаточно интенсивный процесс выбора. Где могли бы мы найти такой процесс?

Биолог, конечно, может сразу ответить на этот вопрос; ибо исследования последнего столетия и особенно последних 30 лет неопровержимо доказали, что естественный, дарвиновский отбор лежит в основе всех видов выбора, столь обильно представленных в биологическом мире. Таким образом, в конечном счете существование вспомогательных регуляторных механизмов следует приписать действию естественного отбора. Следовательно, индивидуум (например, наш котенок) может либо получить их с генотипом, либо выработать на основе принципа ультрастабильности в процессе своего развития. Других источников нет.

17.14. Однако вопрос об адаптации механизмов, сходных с мозгом, интересует в наши дни наряду с биологами гораздо более широкий круг читателей. Поэтому я сделаю краткий обзор процессов отбора, с тем чтобы читатель, не имеющий биологической подготовки, мог

видеть, как именно должны создаваться вспомогательные регуляторные механизмы в неживых механизмах, конструктивно подобных мозгу.

Этот обзор послужит и другой цели. До сих пор мы исходили из факта адаптации (гл. 1), рассматривали его как следствие и стремились выяснить его причины. Это не было естественным направлением хода рассуждений, который был бы несравненно проще и яснее, если бы мы взяли исходное состояние и затем поставили вопрос: что будет происходить дальше? Поэтому я намерен обрисовать процесс в его естественном направлении и показать, что даже в том случае, когда исходная точка охарактеризована весьма обобщенно, неизбежным конечным результатом будет адаптация.

Глава 18

УСИЛЕННАЯ АДАПТАЦИЯ

Отбор в системе, определяемой состоянием

18.1. Происхождение различных форм отбора перестает быть проблемой, как только мы уясняем себе, что отбор — явление далеко не редкое и в большей или меньшей степени его осуществляет *каждая* изолированная система, определяемая состоянием («Введение в кибернетику», § 13/19). В такой системе две линии поведения могут слиться в одну, но одна линия не может разделиться на две, и поэтому *число возможных состояний системы может только уменьшаться.*

Такой отбор хорошо известен, но в простых системах он проявляется только в тривиальной форме. Например, часы с пружинным заводом избирательно движутся к незаведенному состоянию: оставьте их в любом промежуточном состоянии с частично заведенной пружиной, и они «найдут дорогу» к незаведенному состоянию, в котором и останутся. Часто повторяемое утверждение, что машины «стремятся» к состоянию равновесия, относится к тому же свойству.

В простых системах это свойство кажется тривиальным, но, по мере того как система усложняется, оно становится более содержательным и интересным. Гомеостат, например, можно рассматривать просто как систему с магнитами и униселекторами, которая движется к частичному равновесию, в котором и остается. Но это равновесие только частичное, и поэтому оно богаче содержанием, чем равновесие часов, у которых кончился завод. Униселекторы неподвижны, но магниты все еще могут двигаться, и при частичном равновесии обнаруживается динамический гомеостаз, который возник в результате *отбора* в процессе движения униселектора к равновесию. Таким образом, в гомеостате начинает

проявляться в некоторой степени то богатство свойств, которое возникает в достаточно сложной (или содержащей достаточное число частей) системе; в такой системе обнаруживается высокая интенсивность отбора при движении к равновесию, и при этом отобранная группа состояний, будучи лишь малой частью общего их числа, все еще настолько обширна, что дает простор для разнообразной динамической активности. Итак, *отбор сложных равновесных состояний, в котором наблюдатель может усмотреть явление адаптации, не следует считать событием исключительным и необыкновенным*: **такой отбор является правилом.** Основная причина, по которой мы не замечали этого факта в прошлом, состоит в том, что наш земной мир в основном бимодален по своим формам: эти формы либо крайне просты (подобно часам с кончившимся заводом), так что мы презрительно игнорируем их, либо крайне сложны, так что мы считаем их чем-то совсем особым и говорим, что они обладают «жизнью».

18.2. Теперь мы можем видеть, что эти два рода форм просто находятся на крайних точках единой шкалы. Гомеостат положил начало созданию промежуточных форм, и современные электронные приборы, особенно цифровые вычислительные машины, несомненно будут постепенно заполнять разрыв, пока наконец внутреннее единство всего ряда не станет очевидным.

Дальнейшие примеры промежуточных форм придумать нетрудно. Вот один пример, показывающий, каким образом в *любой* системе, определяемой состоянием, некоторые свойства будут проявлять бóльшую тенденцию к сохранению (или «выживанию»), нежели другие. Предположим, что вычислительная машина имеет 100 ячеек памяти, обозначенных 00,...,99, каждая из которых вначале содержит одну десятичную цифру (т. е. одну из цифр 0,1,2,...,9), выбранную случайно, независимо и с равной вероятностью для всех цифр. Машина имеет также генератор случайных чисел (основанный, лучше всего, на тепловом движении молекул). Пусть она много раз выполняет следующую операцию:

«Нужно взять два случайных числа, из двух цифр каждое; допустим, это будут 82 и 07. В этом случае нужно перемножить числа, находящиеся в ячейках 82 и 07, и заменить цифру в первой ячейке (82) последней цифрой произведения».

Как известно, произведение двух четных чисел будет четным, а произведение двух нечетных чисел — нечетным; но умножение четного числа на нечетное даст четное число, так что в первой ячейке возможна смена нечетного числа на четное, но не наоборот. В результате ячейки памяти, в которых четных и нечетных чисел вначале было примерно поровну, будут содержать все больше и больше четных чисел, нечетные же будут постепенно исчезать. Биолог мог бы сказать, что в «борьбе» за ячейки памяти и за «выживание» в них четные числа обладают преимуществом и неизбежно «истребят» своих конкурентов — нечетные числа.

Даже среди четных чисел встречаются разные степени «приспособленности». Нули имеют гораздо больше шансов «выжить», чем остальные четные числа, и наблюдатель увидит, что со временем нули захватывают все больше ячеек. В конце концов они полностью истребят своих конкурентов.

18.3. Процесс, рассмотренный в этом примере, легко поддается исследованию, но он, к сожалению, почти тривиален. Нетрудно было бы подобрать более сложные примеры, но они ничего не сказали бы нам о действующих принципах (хотя были бы чрезвычайно полезными и убедительными). Все примеры показали бы, что, когда над группой состояний повторно совершается однозначная операция (эта операция образует «законы» системы), система стремится к таким состояниям, на которые данная операция не влияет или влияет в сравнительно малой степени. Иными словами, в результате *всякой однозначной операции происходит отбор форм, обладающих особой способностью противостоять ее изменяющему действию.* В простых системах этот факт почти банален, в сложных его никак нельзя назвать банальным. А когда он проявляется в грандиозных масшта-

бах, в системах с миллионами переменных и на протяжении миллионов лет, тогда весьма вероятно, что отобранные состояния будут поистине замечательными и будут обусловливать высокоразвитую *координацию частей*, стремящуюся сделать эти состояния устойчивыми к действию данной операции.

Таким образом, развитие жизни на Земле *не следует* считать чем-то удивительным. Напротив, оно было неизбежно. Оно было неизбежно в том смысле, что если такая обширная система, как поверхность Земли, в основе своей полистабильная, в динамическом отношении как бы «подогревалась на медленном огне» в течение 5 млрд. лет, то разве только чудо могло бы предохранить ее от тех состояний, в которых переменные группируются в комплексы, способные к интенсивной «самозащите». *Количество* отбора, производимого этой системой (мы знаем лишь один пример такой системы), на столько порядков величины больше всего того, что мы испытываем как индивидуумы, что нам, естественно, не так легко заметить идентичность этого процесса с процессом, который кажется нам тривиальным в системах, наблюдаемых нами повседневно. И тем не менее это так; бóльшая протяженность в пространстве позволяет испытывать необозримое число форм, а бóльшая протяженность во времени позволяет этим формам достигнуть несравненно более высокой степени координации.

Таким путем мы можем проследить вполне естественное происхождение генотипов, распространенных ныне на Земле; нас не удивляет, что на Земле развились формы, которые в сочетании с формами окружающей их среды обнаруживают в высшей степени поразительную устойчивость к изменяющим воздействиям внешнего мира. Это не та малоинтересная статическая устойчивость, которая свойственна куску гранита или часам с кончившимся заводом, а гораздо более содержательная динамическая устойчивость, связанная с тем, что генотипы образуют вокруг себя сложные динамические системы («тела» организмов с такими добавлениями, как гнезда и всевозможные орудия), так что целое осуществ-

ляет гомеостаз и достигает самосохранения с помощью активных защитных средств.

18.4. Для нас особый интерес представляет существование *прямых* и *непрямых* активных защитных средств. *Прямые* рассматривались только в § 1.3. К ним относятся все регуляторные механизмы, определяемые *в деталях* генотипом. Они адаптивны потому, что условия, требовавшие их появления, были постоянны на протяжении многих поколений.

Ранние формы генотипов адаптировались только таким способом. Однако более поздние формы выработали специализацию, способную защитить их от того класса возмущений, против которого ранние были беззащитны. Этот класс состоит из таких возмущений, которые, не будучи постоянными в течение многих поколений (так что генотипическая адаптация к ним невозможна: изменения слишком быстры), тем не менее постоянны в течение жизни одного поколения. Когда возмущения этого типа часты, организму выгодно бывает выработать механизм адаптации, который в общих чертах контролируется генотипом (так как одни и те же общие особенности требуются на протяжении многих поколений), а в деталях определяется частными обстоятельствами, с которыми встречается то или иное поколение.

Таков механизм научения. Его особенность состоит в том, что генотип передает часть своего контроля над организмом внешней среде. Например, он не определяет в деталях, как котенку следует ловить мышь, но дает ему механизм научения и склонность к игре, так что *сама мышь* учит котенка всем тонкостям ловли мышей.

Это и есть регуляция, или адаптация, осуществляемая непрямым методом. Генотип, так сказать, не диктует, а просто снабжает котенка способностью создавать свои собственные формы адаптации, руководствуясь в деталях особенностями среды.

18.5. Теперь мы можем ответить на вопрос, поставленный в § 17.12, и представить себе, как нужно применять закон необходимого разнообразия при решении вопроса о механизмах осуществления вспомогательных регуля-

торных процессов, т. е. установления надлежащих значений необходимых параметров.

Некоторые из них могут быть установлены под прямым контролем генотипа, так что организм с рождения обладает правильными значениями ряда параметров. Это возможно лишь в том случае, если условия среды были постоянными в течение достаточно долгого времени, а процессы естественного отбора — достаточно интенсивными и продолжительными для того, чтобы весь осуществленный отбор в целом удовлетворял требованиям упомянутого закона.

Некоторые вспомогательные регуляторные процессы, возможно, осуществляются в организме не под прямым влиянием генотипа, а с помощью одного промежуточного звена. В этом случае генотип как бы устанавливает величины, ведущие к появлению механизма (по существу регуляторного), который затем *самостоятельно* начинает приводить соответствующие параметры к надлежащим значениям.

Другие вспомогательные регуляторные процессы генотип мог бы осуществлять в два этапа; но нам нет необходимости прослеживать дальнейшие возможные усложнения, так как реальные системы редко бывают так четко разделены на ряд уровней (§ 17.9). Здесь мы должны лишь отметить, что адаптация может быть достигнута в результате либо прямого, либо непрямого действия генотипа.

Усиленная адаптация

18.6. В тех случаях, когда условия среды, к которым адаптируется организм, постоянны на протяжении слишком короткого времени для того, чтобы могла произойти адаптация генотипа, научение представляет собой единственный метод достижения адаптации. Уже по одной этой причине следовало бы ожидать, что более высокоразвитые организмы будут способны к научению. Этот метод, однако, обладает еще одним своеобразным преимуществом, на которое стоит обратить внима-

ние, особенно тогда, когда мы рассмотрим ограничения, вытекающие из закона необходимого разнообразия, и поставим вопрос, *какой объем* регулирования может быть достигнут генотипом в обоих случаях (т.е. при прямом и непрямом действии).

Прямое и непрямое регулирование происходит следующим образом. Предположим, что нужно удерживать существенную переменную X в пределах между x' и x''. Всё, действующее непосредственно на X и удерживающее X в этих пределах, осуществляет прямое регулирование. Однако может случиться, что существует механизм M, влияющий на X и способный удерживать X в пределах от x' до x'' при условии, что некоторый параметр P (параметр для M) удерживается в пределах от p' до p''. Если теперь какой-либо агент избирательно действует на P таким образом, что удерживает P в этих пределах, то конечный результат, после воздействия M, будет состоять в том, что X будет находиться в пределах между x' и x''.

В общем случае объемы регуляции, необходимые для удержания P в пределах от p' до p'' и X — от x' до x'', независимы. Закон необходимого разнообразия не связывает их между собой. Может, например, случиться, что *малый* объем регуляции в отношении P приведет к осуществлению значительно большего объема регуляции в отношении X.

При прямом регулировании объем регуляции, которым характеризуется величина X, абсолютно ограничен тем объемом регуляции, который может быть ей доставлен (согласно закону необходимого разнообразия); но при непрямом регулировании X *может характеризоваться бóльшим объемом регуляции, чем объем, получаемый величиной P*. Таким образом, непрямое регулирование создает возможность усиления регуляции в смысле увеличения ее объема; в этом его значение.

18.7. Живые организмы встретились с этой возможностью миллиарды лет тому назад, ибо генотип — это канал связи от родителей к потомству: «Обзаведитесь парой глаз,— как бы говорится в передаваемом по нему

сообщении, — они, вероятно, пригодятся; и не плохо бы вам иметь в крови гемоглобин — окиси углерода мало, а кислород встречается в изобилии». Как канал связи генотип имеет определенную конечную пропускную способность, равную, скажем, Q. Если эта пропускная способность используется непосредственно, то, по закону необходимого разнообразия, объем регуляции, которым мог бы пользоваться организм для защиты от факторов среды, не может превышать Q. Организмы, не способные к научению, должны довольствоваться этим пределом. Если, однако, регуляция осуществляется непрямым путем, то при надлежащем использовании величины Q организм может достигнуть объема регуляции, значительно превышающего Q. Таким образом, для научающихся организмов эта величина уже не служит пределом.

Возможность такого усиления хорошо известна в некоторых других случаях. Если ребенок хочет узнать значение ряда английских слов, а его отец располагает для помощи ему лишь десятью минутами, то отец может действовать двумя способами. Он может в эти десять минут объяснить ребенку значение стольких слов, сколько можно успеть за это время. Очевидно, что число слов будет иметь предел. Таков прямой метод. Непрямой метод состоял бы в том, что отец в эти десять минут показал бы ребенку, как пользоваться словарем. За это время ребенок в известном смысле не продвинется ни на шаг вперед: его словарный запас не пополнится ни одним словом. Тем не менее второй метод обладает очень важным преимуществом, ибо в будущем число слов, которые ребенок сможет понять, уже не ограничено тем, что можно уложить в десять минут. Причина состоит в том, что если информация о значении слов должна передаваться непосредственно через отца, она ограничена 10-минутным промежутком времени, тогда как при непрямом методе информация передается частично через отца, а частично по другому каналу (словарю), который стал доступным для ребенка в результате действий отца, занявших десять минут.

Таким же образом генотип, определяющий развитие животного, способного к научению, использует часть своих ресурсов на формирование головного мозга, адаптация которого определяется не только деталями генотипа, но и деталями окружающей среды. Среда действует наподобие словаря. Если оса-охотница при нападении на свою добычу руководствуется в деталях наследственным инстинктом, то котенка учат ловить мышей сами мыши. Таким образом, у животного, способного к научению, информация, получаемая с генотипом, в большой мере *дополняется* информацией, поступающей из внешней среды; поэтому общее «количество адаптации» после научения может быть больше количества, передаваемого непосредственно через генотип.

Резюме

Главное заключается в том, что *все* динамические системы, определяемые состоянием, селективны: в каком бы состоянии они ни находились вначале, они идут к состояниям равновесия. Состояния равновесия всегда характеризуются в их отношении к законам изменений системы *исключительной стойкостью*.

(Особенно стойки те формы, существование которых приводит, безразлично каким путем, к появлению новых копий тех же самых форм, — так называемые «репродуцирующиеся» формы.)

Если система допускает возникновение равновесия в отдельных ее частях, то последние принимают форму динамических подсистем, исключительно устойчивых к разрушительным воздействиям местных событий.

Изучая внутреннюю организацию такой стабильной динамической подсистемы, мы увидим, что действие ее частей *координируется* в процессе их защиты от возмущений.

Когда тип возмущений изменяется от одного поколения организмов к другому, но постоянен в пределах каждого поколения, еще более стойкими оказываются

формы, рождающиеся с таким механизмом, который под влиянием *среды* может оказывать регулирующее действие, направленное против данной среды; о таких формах организмов говорят, что они способны к «научению».

В нашей книге мы рассматривали главным образом последний этап этого процесса. Исследовав наиболее простые и ясные случаи, мы показали, как генотип может обеспечить создание механизма (с основными и вспомогательными частями), который при воздействии любой данной среды неизбежно будет адаптироваться именно к этой среде.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Глава 19

СИСТЕМЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ СОСТОЯНИЕМ

19.1. Применение математических методов для изучения адаптации не сводится к решению частных математических задач. Биоматематик начинает с установления основных логических предпосылок, необходимых для описания принципиальной конструкции того или иного механизма, обобщает и развивает их в разных направлениях (например, от дискретного к непрерывному и от неметрического к метрическому) и наконец разрабатывает конкретные методы для решения частных задач.

Так как проблемы, интересующие биологов, обычно связаны с очень сложными системами, в которых изучение *всех* явлений не представляется возможным, особую важность приобретают такие методы, как топологический, которые позволяют получать простые ответы на простые вопросы, несмотря на сложность изучаемого явления. Наша математическая основа, следовательно, должна быть достаточно общей, чтобы допускать применение топологических методов. Здесь нам большую помощь оказал замечательный труд коллектива французских математиков, изданный под псевдонимом Н. Бурбаки. В своих великолепных «Элементах математики» эти авторы показали, как теория множеств в ее простейшей форме может постепенно развиваться и проникать без малейшей потери точности или малейшего изменения основных концепций в топологию, алгебру, геометрию, теорию функций, дифференциальные уравнения и другие ветви математики.

В части I «Введения в кибернетику» уже показано, каким образом на основе теории множеств, понимаемой так, как она изложена Бурбаки, строится изучение ло-

гики механизма. (Обозначения, принятые в этой книге, не совпадают с обозначениями в работе Бурбаки, но основные концепции этой работы используются повсюду и именно в той форме, в которой их излагают французские авторы; таким образом, читатель, который пожелает сравнить «Введение в кибернетику» с работой Бурбаки, найдет, что соответствие в большинстве мест очевидно.)

Логика механизма

19.2. Нашим отправным пунктом является мысль более чем вековой давности, что «машина» — это то, что, находясь в данных условиях и в данном внутреннем состоянии, переходит всегда в одно и то же определенное состояние (а не в различные состояния в различных случаях). Это определение сразу устанавливает формальное соответствие «машины» с «алгебраическим законом внешнего произведения» Бурбаки, так как если внешние условия могут быть любыми из множества Ω, а внутреннее состояние машины — любым из множества E, то машина своим поведением определяет отображение (у Бурбаки «application») множества $\Omega \times E$ в E. Концепция «машины», таким образом, *в точности* соответствует одной из самых основных концепций математики.

Это основное соответствие немедленно влечет за собой много других. Если элемент из Ω зафиксировать, то получится отображение E в E, соответствующее изолированной машине. Элемент из E, инвариантный в алгебре (по отношению к некоторым значениям из Ω), соответствует состоянию равновесия машины при постоянном входе или постоянных окружающих условиях (т. е. для данного поля). Совместимость (или несовместимость) отношения эквивалентности с законом внешнего произведения соответствует тому, что предполагаемое упрощение системы, определяемой состоянием, приводит (или не приводит) к новой системе, по-прежнему определяемой состоянием. Если происходит такое упрощение, то алгебраический закон деления соответствует новому, упрощенному каноническому представлению.

Этот способ установления соответствия и его дальнейшие применения заслуживают подробного изучения.

Я не намерен развивать здесь эту тему ab initio и подробно. Поскольку книга эта прежде всего относится к мозгу и к системам, общим свойством которых является непрерывность, мы только заметим, что у Бурбаки показано, каким образом основные положения, сформулированные в дискретной форме, могут быть приведены к непрерывной форме. Именно с такой непрерывной формой мы будем иметь дело в настоящем приложении.

(N. B. Всюду в этой главе внимание сосредоточено на изолированных системах; мы хотим показать, как они будут себя вести при отсутствии внешних воздействий, за исключением происходящего время от времени вмешательства со стороны экспериментатора. Наши формулировки следует считать относящимися именно к такому случаю. Гл. 21 специально посвящена системам, в которых окружающие условия или вход подвергаются изменениям.)

19.3. Переменные рассматриваются как функции времени. Систему n переменных мы будем обычно обозначать $x_1, x_2, .., x_n$ или иногда, короче, x. Случай $n=1$ не исключается. Везде будет предполагаться, что n конечно. Систему с бесконечным числом переменных (как, например, в § 19.17) мы будем заменять системой, в которой n конечно, i пробегает дискретные значения, а сама система пренебрежимо мало отличается от исходной.

Каждая переменная x_i есть функция времени t. Чтобы подчеркнуть это, иногда мы будем писать $x_i(t)$. Эти функции должны быть однозначными, но не обязательно непрерывными. Постоянную величину можно рассматривать как переменную, претерпевающую нулевое изменение.

19.4. Состояние системы в момент времени t есть совокупность численных значений $x_1(t), .., x_n(t)$. Два состояния $(x_1, ..., x_n)$ и $(y_1 ..., y_n)$ равны, если $x_i = y_i$ для всех i.

19.5. Переход может быть определен только по истечении некоторого интервала времени — конечного, обозна-

чаемого Δt, или бесконечно малого, обозначаемого dt. Он определяется двумя состояниями: одним в момент времени t и другим по истечении указанного интервала времени.

Линия поведения определяется последовательностью состояний и временны́х интервалов между ними. Две линии поведения идентичны, если равны все соответствующие состояния и временны́е интервалы в последовательности. (Иными словами, две линии поведения, отличающиеся только абсолютным временем их начала, считаются идентичными.)

19.6. Основная операция — это физическое, а не математическое явление, требующее реальной машины и реального оператора или экспериментатора. Он выбирает начальное состояние $(x_1^0, \ldots, x_n^0)$, а затем следит за переходом, совершающимся при изменении системы в соответствии с ее внутренними законами.

19.7. Если при повторных применениях основной операции к начальному состоянию S обнаруживается, что все линии поведения системы одинаковы, и если то же самое справедливо и для всех других состояний S', S'',... системы, то система называется **регулярной**.

Такая система может быть представлена в виде

$$x_1 = F_1(x_1^0, \ldots, x_n^0;\ t-t_0),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$x_n = F_n(x_1^0, \ldots, x_n^0;\ t-t_0),$$

где F_i являются однозначными функциями своих аргументов, а в остальном произвольны. Если $t=t_0$ отвечает начальному состоянию, мы, очевидно, должны иметь

$$F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0;\ 0) = x_i^0 \quad (i=1, \ldots, n).$$

19.8. Теорема: *Линии поведения системы, определяемой состоянием, определяют группу.*

Пусть x^0 — начальное состояние $(t_0=0)$, где одним символом обозначены все n переменных, и пусть за время t' состояние x^0 перешло в x'. Пусть система с начальным состоянием x' за время t'' переходит в состояние x'',

Так как мы имеем дело с системой, определяемой состоянием, то, если из состояния x^0 совершить переход, отвечающий времени $t'+t''$, линия поведения системы должна получиться той же самой. Таким образом,

$$x_i''=F_i(x_1', \ldots, x_n'; t'')=F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; t'+t'')$$
$$(i=1, \ldots, n).$$

Но

$$x_i'=F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; t') \quad (i=1, \ldots, n),$$

что дает

$$F_i\{F_1(x^0; t'), \ldots, F_n(x^0; t'); t''\}=$$
$$=F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; t'+t'') \qquad (i=1, \ldots, n)$$

для всех значений x^0, t' и t'' из некоторой заданной области; а это и есть один из способов определения однопараметрической непрерывной группы.

Пример. Система с линиями поведения

$$x_1=x_1^0+x_2^0t+t^2,$$
$$x_2=x_2^0+2t$$

— это система, определяемая состоянием, а система

$$x_1=x_1^0+x_2^0t+t^2,$$
$$x_2=x_2^0+t$$

— нет.

Каноническое представление

19.9. Теорема: *Для того чтобы система $x_1, \ldots, x_n$ была системой, определяемой состоянием, необходимо и достаточно*[1], *чтобы x_i как функции от t удовлетворяли уравнениям*

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt}&=f_1(x_1, \ldots, x_n),\\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\\ \frac{dx_n}{dt}&=f_n(x_1, \ldots, x_n), \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

[1] Если все $x_i(t)$ дифференцируемы. — *Прим. перев.*

где f_i — однозначные, но не обязательно непрерывные функции своих аргументов. Иными словами, производные переменных $x_1, \ldots, x_n$ могут быть определены как функции этих переменных без участия (явного или неявного) других функций от времени. Уравнения в этом виде называются **каноническим представлением системы.**

(Эти уравнения мы будем иногда писать в виде

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n) \qquad (i=1, \ldots, n) \qquad (2)$$

или даже совсем коротко $\dot{x}=f(x)$, если смысл ясен из контекста.)

(1) Пусть дана система, определяемая состоянием. Заданные при $t=0$ начальные условия $x_1^0, \ldots, x_n^0$ переходят за время t в $x_1, \ldots, x_n$, а за время $t+dt$ в $x_1+dx_1, \ldots, x_n+dx_n$. Зададим также при $t=0$ начальные условия $x_1 \ldots, x_n$ и посмотрим, во что они перейдут за время dt. По групповому свойству (§ 19.8) конечное состояние должно быть одним и тем же. Используя обозначения, введенные в §19.8, получим, что из состояния x_i^0 система переходит в состояние $F_i(x^0, t+dt)$, а из x_i — в состояние $F_i(x, dt)$. Следовательно,

$$F_i(x^0;\ t+dt) = F_i(x,\ dt) \qquad (i=1, \ldots, n).$$

Применим формулу Тэйлора[1] и обозначим $\frac{\partial}{\partial b} F_i(a, b)$ через $F_i'(a, b)$. Тогда

$$F_i(x^0;\ t) + dt \cdot F_i'(x^0;\ t) = F_i(x;\ 0) + dt \cdot F_i'(x;\ 0)$$
$$(i=1, \ldots, n).$$

Но $F_i(x^0;\ t) = F_i(x,\ 0) = x_i$. Следовательно,

$$F_i'(x^0;\ t) = F_i'(x;\ 0) \qquad (i=1, \ldots, n). \qquad (3)$$

Но $x_i = F_i(x^0;\ t) \qquad (i=1, \ldots, n)$.

---

[1] До сих пор на функции $F_i(x, t)$ не было наложено никаких ограничений, кроме однозначности. Здесь необходимо потребовать их непрерывную дифференцируемость. — *Прим. перев.*

Поэтому

$$\frac{dx_i}{dt}=\frac{\partial}{\partial t}F_i(x^0;\ t)=F_i'(x^0;\ t).$$

Учитывая уравнение (3), получаем

$$\frac{dx_i}{dt}=F_i'(x;\ 0)\qquad (i=1,\ \ldots,\ n).$$

Следовательно, теорема доказана, так как $F_i'(x;\ 0)$ содержит t только через посредство $x_1, \ldots, x_n$, а не в какой-либо другой, явной или неявной форме.

Пример 1. Первая из систем, рассмотренных в § 19.8, приводит к следующим дифференциальным уравнениям в канонической форме:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt}&=x_2,\\ \frac{dx_2}{dt}&=2.\end{aligned}\right\}$$

Вторая система, рассмотренная в том же параграфе, не может быть представлена в таком виде, так как не является системой, определяемой состоянием, и для нее групповое свойство не выполняется.

Следствие:

$$f_i(x_1,\ \ldots,\ x_n)\equiv\left[\frac{\partial}{\partial t}F_i(x_1,\ \ldots,\ x_n;\ t\right]_{t=0}$$
$$(i=1,\ \ldots,\ n).$$

(2) Дифференциальные уравнения (1) можно записать в виде

$$dx_i=f_i\ (x_1,\ \ldots,\ x_n)\cdot dt\qquad (i=1,\ \ldots,\ n).$$

Мы видим, что данное множество значений $x_1, \ldots, x_n$, т. е. данное состояние системы, определяет изменение dx_i в каждой переменной x_i за временной интервал dt. Интегрированием можно определить линию поведения, идущую от этого состояния. Следовательно, это система, определяемая состоянием.

Пример 2. Интегрирование уравнений

$$\left.\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt}&=x_2,\\ \frac{dx_2}{dt}&=2\end{aligned}\right\}$$

вновь приводит к групповым уравнениям примера из § 19.8.

19.10. Определение. Система называется **линейной**, если все функции $f_1, \ldots, f_n$ линейно зависят от своих аргументов.

19.11. Пример 3. Уравнения гомеостата можно получить следующим образом: пусть x_i — угол отклонения i-го магнита от его среднего положения; тогда силы, действующие на него, линейно зависят от момента количества движения, пропорционального $\dot{x}$, трения, также пропорционального $\dot{x}$, и четырех токов в обмотках, пропорциональных x_1, x_2, x_3 и x_4. Если все четыре блока гомеостата одинаковы, то мы получим

$$\frac{d}{dt}(m\dot{x}_i)=-k\dot{x}+l(p-q)(a_{i1}x_1+\ldots+a_{i4}x_4)$$
$$(i=1,\ 2,\ 3,\ 4),$$

где p и q — потенциалы на концах сосуда с водой, l зависит от лампы, k — от трения стрелки, m — от момента инерции магнита. Если положить $h=l(p-q)/m$ и $j=k/m$, то уравнения принимают вид

$$\left.\begin{aligned}dx_i/dt&=\dot{x}_i,\\ d\dot{x}_i/dt&=h(a_{i1}x_1+\ldots+a_{i4}x_4)-j\dot{x}_i\end{aligned}\right\}\ (i=1,\ 2,\ 3,\ 4),$$

из чего следует, что эта система с восемью переменными — линейная система, определяемая состоянием.

Ее можно также записать в виде

$$\left.\begin{aligned}\frac{dx_i}{dt}&=\dot{x}_i,\\ \frac{d\dot{x}_i}{dt}&=\\ &=\frac{k}{m}\left\{\frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1+\ldots+a_{i4}x_4)-\dot{x}_i\right\}\end{aligned}\right\}(i=1,2,3,4).$$

Пусть $m \to 0$. Тогда[1] значения $d\dot{x}_i/dt$ становятся очень большими, но это не относится к dx_i/dt. Поэтому $\dot{x}_i$ быстро стремятся к

$$\frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1 + \ldots + a_{i4}x_4),$$

тогда как медленно меняющиеся x_i не могут быстро изменить значения, к которым стремятся $\dot{x}_i$. В пределе

$$\frac{dx_i}{dt} = \dot{x}_i = \frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1 + \ldots + a_{i4}x_4) \quad (i = 1, 2, 3, 4).$$

Вводя $\tau = \frac{l(p-q)}{k}t$, т. е. изменяя масштаб времени, получим уравнения

$$dx_i/d\tau = a_{i1}x_1 + \ldots + a_{i4}x_4 \quad (i = 1, 2, 3, 4),$$

показывающие, что система x_1, x_2, x_3, x_4 определяется состоянием и линейна. Коэффициенты a_{ij} имеют здесь значения, устанавливаемые переключателями на входе (см. фиг. 35).

19.12. Теоремы, сформулированные в предыдущих параграфах, показывают, что следующие свойства являются эквивалентными, т. е. выполнение одного из них влечет за собой выполнение остальных:

(1) система определяется состоянием;

(2) через каждую точку поля проходит лишь одна линия поведения;

(3) линии поведения могут быть определены уравнениями вида

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n) \quad (i = 1, \ldots, n),$$

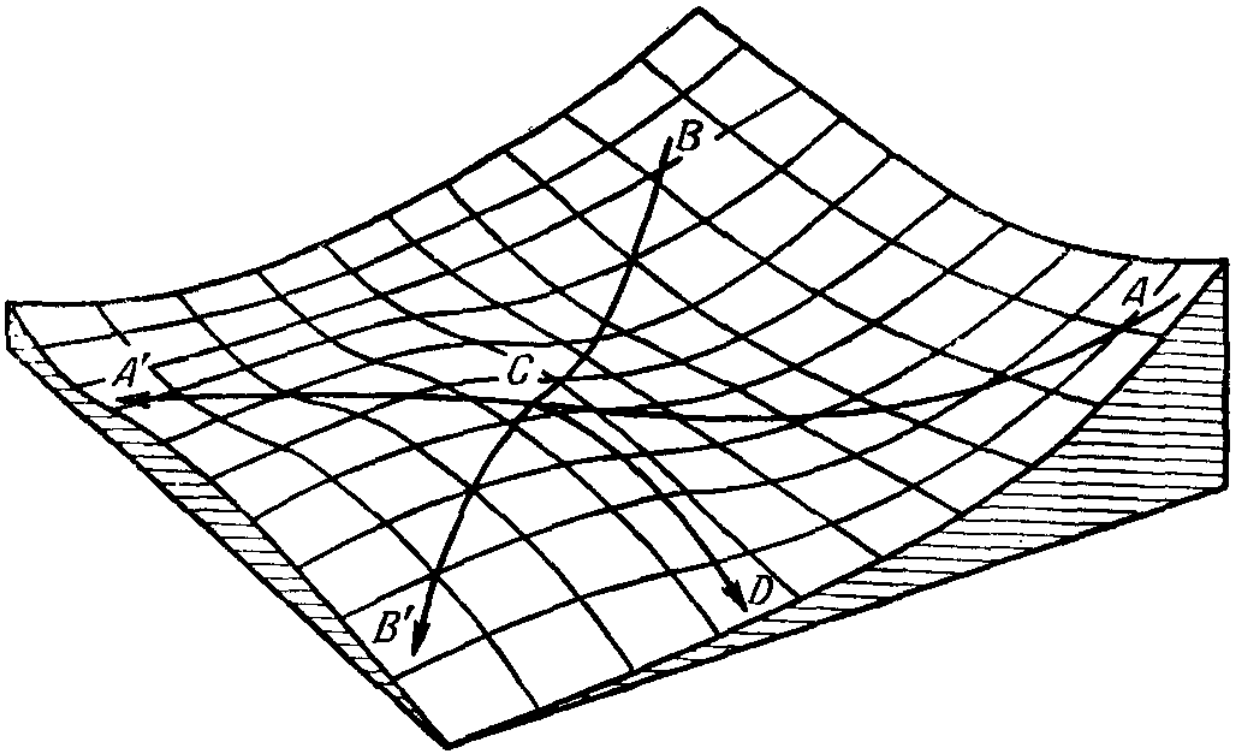
правые части которых не содержат других функций от t, кроме тех, чьи производные содержатся в левых частях[2].

---

[1] Предельный переход выполнен нестрого. На самом деле эта задача требует привлечения более тонкого математического аппарата.— *Прим. перев.*

[2] Утверждение не совсем точно. Для того чтобы свойства (1) и (2) были эквивалентны свойству (3), необходимо потребовать дифференцируемость линий поведения в (1) и (2).— *Прим. перев.*

19.13. Приведем простой пример регулярной, но не определяемой состоянием системы. Возьмем стол, поверхность которого искривлена, так что вместо плоского она имеет мягко всхолмленный вид (фиг. 65). Глядя на него сверху, мы можем разметить его поверхность сетью линий, играющей роль системы координат. Если мы поместим шарик в какую-нибудь точку и затем отпустим его, он покатится. Отмечая его положения,



Фиг. 65.

скажем, через 0,1 *сек*, мы определим линию поведения системы двух переменных, определяемой нашими координатами.

Если поверхность стола сделать аккуратно, линии поведения будут точно воспроизводиться и система будет регулярной. Тем не менее экспериментатор, ничего не знающий о силах тяготения или количествах движения, нашел бы эту систему неудовлетворительной. Он установил бы, что шарик, отправляясь из A, всегда приходит в A', отправляясь из B всегда приходит в B'. А вот объяснить поведение шарика в точке C он затруднился бы. И если бы экспериментатор попытался прояснить ситуацию, отправив шарик из самой точки C, он обнаружил бы, что шарик движется в D! Он сказал

бы, что совершенно не может понять эту систему, так как, хотя каждая линия поведения точно воспроизводима, различные линии поведения находятся в очень сложных отношениях друг к другу. Экспериментатор отверг бы эту систему двух переменных и не успокоился бы до тех пор, пока сам или с помощью нового Ньютона не открыл новую систему, которая действительно будет определяться состоянием. В моей теории я настаиваю на фундаментальном значении систем, определяемых состоянием, так как я согласен с экспериментаторами, стремящимися иметь дело с такими системами в практической работе.

Преобразования канонического представления

19.14. В некоторых случаях изолированные системы изучаются с помощью методов, отличных от применяемого нами. В следующих параграфах рассмотрены некоторые приемы, с помощью которых различные способы исследования системы сводятся к описанному у нас.

19.15. Иногда изучение системы упрощается в результате замены переменных. Это означает, что вместо старых переменных $x_1, \ldots, x_n$ мы вводим в рассмотрение такое же число новых переменных $y_1, \ldots, y_n$, связанных со старыми с помощью однозначных функций φ_i:

$$y_i = \varphi_i(x_1, \ldots, x_n) \quad (i = 1, \ldots, n).$$

Если представлять переменные с помощью стрелок на шкалах, то такая замена переменных означает переход к новым шкалам, на каждой из которых регистрируется некоторая функция старых. Если функции φ_i не зависят явно от времени, то новая система, как и исходная, будет системой, определяемой состоянием.

19.16. В § 19.11 (пример с гомеостатом) мы рассматривали производные как независимые переменные. Я пришел к выводу, что этот прием обладает общими преимуществами: не создавая трудностей и не приводя к несов-

местимым системам, он придает нашему методу изящное единообразие.

Например, имея уравнения некоторой системы, определяемой состоянием, мы можем записать их в виде

$$\dot{x}_i - f_i(x_1, \ldots, x_n) = 0 \quad (i = 1, \ldots, n)$$

и рассматривать их как n уравнений с $2n$ алгебраически независимыми переменными $x_1, \ldots, x_n, \dot{x}_1, \ldots, \dot{x}_n$. Продифференцируем теперь все уравнения q раз. Мы получим $(q+1)n$ уравнений с $(q+2)n$ переменными и их производными. Затем мы можем произвольно выбрать n из этих переменных и, оставив, кроме них, еще n их производных, исключить остальные qn переменных, использовав для этого qn уравнений. Если обозначить выбранные переменные $z_1, \ldots, z_n$, мы получим n уравнений с $2n$ переменными

$$\Phi_i(z_1, \ldots, z_n, \dot{z}_1, \ldots, \dot{z}_n) = 0 \quad (i = 1, \ldots, n),$$

где z_k играют роль независимых переменных (вместо x_k), а $\dot{z}_k$ соответствуют $\dot{x}_k$. Чтобы придать этим уравнениям канонический вид, остается лишь разрешить эти уравнения относительно $\dot{z}_1, \ldots, \dot{z}_n$. Легко видеть, что полученная система, как и первоначальная, является системой, определяемой состоянием (см. § 19.9).

Таким образом, *в системе, определяемой состоянием, можно исключить часть переменных, вводя вместо них в рассмотрение производные остальных переменных.*

Пример. В системе

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 - x_2, \\ \dot{x}_2 &= 3x_1 + x_2 \end{aligned}\right\}$$

можно исключить x_2, введя в качестве новой независимой переменной $\dot{x}_1$. Легко получаем новую систему в канонической форме

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= \dot{x}_1, \\ d\dot{x}_1/dt &= -4x_1 + 2\dot{x}_1, \end{aligned}\right\}$$

где независимыми переменными являются x_1 и $\dot{x}_1$.

19.17. Изолированные системы, в которых действие одной переменной на другие передается с запаздыванием на конечный промежуток времени, могут быть приведены к виду систем, определяемых состоянием, если к переменным системы добавить их производные в качестве новых независимых переменных. Пусть, например, действие x_1 на x_2 передается за 2 единицы времени, а действие x_2 на x_1 — за 1 единицу времени. Если зависимость x от времени мы записываем как $x(t)$, то получаем следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} dx_1(t)/dt &= f_1\{x_1(t),\ \ x_2(t-2)\}, \\ dx_2(t)/dt &= f_2\{x_1(t-1),\ x_2(t)\}. \end{aligned}\right\}$$

Это не каноническая форма системы. Однако, разлагая $x_1(t-1)$ и $x_2(t-2)$ в ряд Тэйлора и добавляя к системе столько производных, сколько необходимо для получения нужной точности, мы можем прийти к определяемой состоянием системе, сколь угодно близкой к исходной.

19.18. Если изменение некоторых переменных связано с кумулятивным эффектом, например $\dot{x}_1 = f\{\int\limits_a^t \varphi(x_2)dt\}$, то, полагая $\int\limits_a^t \varphi(x_2)dt = y$, получим систему, эквивалентную исходной, но уже в канонической форме:

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= f(y), \\ dy/dt &= \varphi(x_2), \\ dx_2/dt &= \quad \ldots \quad \text{и т. д.} \end{aligned}$$

19.19. Если изменение одной переменной зависит от скорости изменения других, например

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= f_1(dx_2/dt,\ x_1,\ x_2), \\ dx_2/dt &= f_2(x_1,\ x_2), \end{aligned}$$

то, подставляя в $f_1(\ldots)$ выражение для dx_2/dt, мы получим каноническую форму уравнений

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= f_1\{f_2(x_1, x_2),\ x_1,\ x_2\}, \\ dx_2/dt &= f_2(x_1, x_2). \end{aligned}\right\}$$

19.20. Если какая-либо переменная меняется мгновенно или настолько быстро, что ошибка будет невелика, если это изменение считать мгновенным, то значение такой переменной может быть представлено как функция значений других переменных, и, таким образом, эту переменную можно исключить из системы.

19.21. Мы редко будем пользоваться явным решением системы

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n) \quad (i = 1, \ldots, n),$$

однако укажем некоторые методы его получения, так как это потребуется нам для некоторых примеров.

(1) Укажем простое символическое решение, с помощью которого можно получить несколько первых членов разложения x_i в степенной ряд по t. Оно дается формулой

$$x_i = e^{tX} x_i^0 \quad (i = 1, \ldots, n), \tag{1}$$

где X — оператор

$$f_1(x_1^0, \ldots, x_n^0) \frac{\partial}{\partial x_1^0} + \ldots + f_n(x_1^0, \ldots, x_n^0) \frac{\partial}{\partial x_n^0}, \tag{2}$$

а

$$e^{tX} = 1 + tX + \frac{t^2}{2!} X^2 + \frac{t^3}{3!} X^3 + \ldots . \tag{3}$$

Сделаем следующее важное замечание: если начальные значения x равны $x_1^0, \ldots, x_n^0$, то любая функция $\Phi(x_1, \ldots, x_n)$ может быть представлена в виде функции от t следующим образом:

$$\Phi(x_1, \ldots, x_n) = e^{tX} \Phi(x_1^0, \ldots, x_n^0). \tag{4}$$

(2) Если функции f_i линейны, т. е.

$$\left.\begin{array}{l} dx_1/dt = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n + b_1, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ dx_n/dt = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n + b_n, \end{array}\right\} \tag{5}$$

и если b_i равны нулю (чего можно добиться[1] переносом начала координат), то уравнения можно записать в матричной форме

$$\dot{x} = Ax, \tag{6}$$

где $\dot{x}$ и x — векторы-столбцы, а A — квадратная матрица $[a_{ij}]$. Решение системы в матричной записи имеет вид

$$x = e^{tA}x^0. \tag{7}$$

(3) Для фактического решения линейных систем наиболее удобен метод преобразования Лапласа. Детальное изложение этого метода читатель может найти в учебниках.

19.22. Любое сравнение систем, определяемых состоянием, с другими типами систем, изучаемых в физике и термодинамике, требует осторожности. Следует заметить, что в концепции системы, определяемой состоянием, вообще не рассматривается энергия системы или закон ее сохранения и что абсолютная система, к какой бы «машине» она не относилась, является по существу необратимой. Это можно установить, рассмотрев уравнения § 19.7, каноническое представление § 19.9 или частный случай такой системы — поле простого маятника (см. фиг. 4).

---

[1] При условии совместности системы $\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j + b_i = 0$, $i = 1, \ldots, n$. — *Прим. перев.*

Глава 20

УСТОЙЧИВОСТЬ[1]

20.1. Как мы увидим в § 21.14, в каноническом представлении содержится вся информация о реальной «машине», которая может быть получена при данном выборе системы переменных. Выбирая определенную систему, экспериментатор знает, что с ее помощью он сможет получить лишь ограниченную часть всей бесконечной информации, которая содержится в реальной «машине». Но даже и эту часть информации не всегда можно получить полностью, так как каноническое представление, определяющее поведение $x_1, \ldots, x_n$, может быть очень сложным и трудным для исследования. Пусть, например, астроном изучает звездное скопление, состоящее из 20 000 звезд, и его интересует вопрос: будет ли это скопление сжиматься в шар или, наоборот, распыляться? Можно было бы написать каноническое представление этой системы (в нем 120 000 переменных), которое в принципе позволило бы ответить на этот вопрос. Но работа, которую пришлось бы для этого проделать, настолько велика, что астрономы, как и другие исследователи в аналогичных случаях, ищут такие методы, при помощи которых можно было бы в *определенных случаях*, не используя всей информации, содержащейся в каноническом представлении, т. е. не вдаваясь во все детали, получать простые ответы на простые вопросы. Отсюда — появление статистических и топологических методов, использование таких понятий, как независимость (§ 12.4) и т. п.

---

[1] В основном тексте книги английский термин «stability» переведен словом «стабильность», принятым в физиологических работах. В этом дополнении, как и в переводе книги Эшби «Введение в кибернетику», «stability» переводится как «устойчивость», в соответствии с общепринятой математической терминологией. — *Прим. перев.*

Среди этих понятий выделяется понятие устойчивости. В гл. 5 «Введения в кибернетику» уже были установлены основные свойства этого понятия. Здесь мы будем рассматривать его только в той форме, которая относится к непрерывным системам, и на том уровне строгости, который необходим для наших целей.

20.2. Пусть дана изолированная система в неизменяющихся условиях, так что она имеет единственное поле; дана область в этом поле и точка в области. Линия поведения называется **устойчивой** по отношению к данному полю, области и точке, если, выходя из этой точки, она целиком содержится в данной области.

20.3. Если внутри заданной области все линии поведения устойчивы и сходятся в одной точке, мы будем говорить, что система обладает **нормальной** устойчивостью.

20.4. Состояние равновесия можно определить различными способами. В поле — это конечная точка некоторой линии поведения. В уравнениях § 19.7 состояние равновесия $X_1, \ldots, X_n$ дается уравнениями

$$X_i = \lim_{t \to +\infty} F_i(x^0, t) \qquad (i = 1, \cdots, n), \tag{1}$$

если существуют все n пределов. В канонических уравнениях эти значения удовлетворяют соотношениям

$$f_i(X_1, \ldots, X_n) = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n). \tag{2}$$

Состояние равновесия является инвариантом группы, так как изменение t не меняет значений $x_1, \ldots, x_n$.

Если якобиан функций f_i, т. е. определитель $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$, который мы будем обозначать J, не равен тождественно нулю, то система имеет изолированное состояние равновесия. Если $J \equiv 0$, но не все миноры $(n-1)$-го порядка равны нулю, то уравнения (2) определяют кривую, каждая точка которой является состоянием равновесия. Если J и все миноры $(n-1)$-го порядка тождественно равны нулю, но среди миноров $(n-2)$-го порядка имеется отличный от нуля, то в поле существует двумер-

ная поверхность, состоящая из точек равновесия; и так далее[1].

20.5. Теорема: *Если все f_i непрерывны и дифференцируемы, то в окрестности положения равновесия система, определяемая состоянием, может быть приближенно заменена линейной* (§ 19.10).

Пусть система, заданная уравнениями

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n) \quad (i = 1, \ldots, n),$$

имеет состояние равновесия $X_1, \ldots, X_n$, т. е.

$$f_i(X_1, \ldots, X_n) = 0 \quad (i = 1, \ldots, n).$$

Положим $x_i = X_i + \xi_i$ $(i = 1, \ldots, n)$, так что x_i определяется своим отклонением ξ_i от положения равновесия. Тогда

$$\frac{d}{dt}(X_i + \xi_i) = f_i(X_1 + \xi_1, \ldots, X_n + \xi_n) \quad (i = 1, \ldots, n).$$

Разлагая правые части уравнений по формуле Тэйлора и замечая, что $\partial X_i/dt = 0$ и $f_i(X) = 0$, получим при бесконечно малых ξ_i систему

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \frac{\partial f_i}{\partial \xi_1}\xi_1 + \ldots + \frac{\partial f_i}{\partial \xi_n}\xi_n \qquad (i = 1, \ldots, n).$$

Частные производные берутся в точке $X_1, \ldots, X_n$ и являются постоянными. Таким образом, полученная система линейна.

20.6. Вообще говоря, для того чтобы проверить устойчивость данной линии поведения, необходимо найти ее уравнения и исследовать их при $t \to +\infty$. Для линейных систем, однако, существуют методы проверки устойчивости, не требующие знания линий поведения в явном виде. В силу того, что многие системы в интересующей нас области близки к линейным (см. § 20.5), эти методы находят широкое применение. Возьмем линейную систему

$$dx_i/dt = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \ldots + a_{in}x_n \quad (i = 1, \ldots, n) \quad (1)$$

Математически строгое изложение этих вопросов см., например, в книге Э. Гурса «Курс математического анализа» — *Прим. перев.*

или, в сокращенной матричной записи (см. § 19.21),

$$\dot{x} = Ax. \tag{2}$$

(Свободные члены в правой части опущены, так как они не влияют на устойчивость.) Если определитель A не равен нулю, система имеет единственное положение равновесия. Если раскрыть определитель

$$\begin{vmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn}-\lambda, \end{vmatrix}$$

то он окажется полиномом n-й степени от λ. Приравнивая его к нулю и, если n нечетно, умножая его на -1, получим **характеристическое уравнение** матрицы A

$$\lambda^n + m_1\lambda^{n-1} + m_2\lambda^{n-2} + \dots + m_n = 0.$$

Каждый коэффициент m_i в этом уравнении равен сумме всех главных миноров i-го порядка матрицы A, умноженной на $(-1)^i$. В частности,

$$m_1 = -(a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn}); \quad m_n = (-1)^n |A|.$$

Пример. Линейная система

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= -5x_1 + 4x_2 - 6x_3, \\ dx_2/dt &= 7x_1 - 6x_2 + 8x_3, \\ dx_3/dt &= -2x_1 + 4x_2 - 4x_3 \end{aligned}\right\}$$

имеет характеристическое уравнение

$$\lambda^3 + 15\lambda^2 + 2\lambda + 8 = 0.$$

Корни $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ характеристического уравнения называются **собственными числами** матрицы A. Интегрируя каноническое представление, мы получим выражение для x_i в виде линейной комбинации[1] экспонент

[1] Если все $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ различны. Если среди корней имеются кратные, то выражение для x_i будет иметь несколько более сложный вид.— *Прим. перев.*

$e^{\lambda_n t}, \ldots, e^{\lambda_1 t}$. Чтобы эта сумма была ограниченной при $t \to +\infty$, действительные части всех λ_i должны быть отрицательны. Это условие является критерием устойчивости линейной системы.

Пример. Уравнение $\lambda^3+15\lambda^2+2\lambda+8=0$ имеет корни $-14{,}902$ и $-0{,}049 \pm 0{,}729\sqrt{-1}$. Поэтому соответствующая линейная система устойчива.

20.7. Сформулируем признак Гурвица, применяемый при исследовании корней характеристического уравнения: для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все определители

$$m_1, \quad \begin{vmatrix} m_1 & 1 \\ m_3 & m_2 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} m_1 & 1 & 0 \\ m_3 & m_2 & m_1 \\ m_5 & m_4 & m_3 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} m_1 & 1 & 0 & 0 \\ m_3 & m_2 & m_1 & 1 \\ m_5 & m_4 & m_3 & m_2 \\ m_7 & m_6 & m_5 & m_4 \end{vmatrix} \quad \text{и т. д.}$$

были положительны (при $q>n$ считаем $m_q=0$).

Пример. Описанная выше система с характеристическим уравнением

$$\lambda^3+15\lambda^2+2\lambda+8=0$$

дает последовательность детерминантов

$$+15, \quad \begin{vmatrix} 15 & 1 \\ 8 & 2 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 15 & 1 & 0 \\ 8 & 2 & 15 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix}$$

Они имеют значения 15, 22 и 176. Следовательно, по признаку Гурвица, система устойчива, что находится в согласии и с предыдущим результатом.

20.8. Другой признак, принадлежащий Никвисту, утверждает, что для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении комплексного переменного λ ($\lambda=a+bi, i=\sqrt{-1}$) вдоль мнимой оси комплексной плоскости от $-i\infty$ до $+i\infty$ полином

$$\lambda^n+m_1\lambda^{n-1}+m_2\lambda^{n-2}+\ldots+m_n$$

менял фазу на $n\pi$.

Критерий устойчивости Никвиста широко применяется в теории электрических цепей и сервомеханизмов. Однако в нем используются данные, получаемые при исследовании реакции системы на постоянное гармоническое возбуждение. Этот прием мало полезен в теории адаптации и поэтому здесь не обсуждается.

20.9. Приведем несколько примеров, иллюстрирующих различные вопросы теории устойчивости линейных систем.

Пример 1. Диагональные члены a_{ii} характеризуют внутреннюю устойчивость переменных. В самом деле, если все переменные, кроме x_i, зафиксировать, то i-е уравнение системы принимает вид

$$dx_i/dt = a_{ii}x_i + c,$$

где c постоянно, и мы видим, что при $a_{ii}<0$ переменная x_i стремится к $-c/a_{ii}$, а при $a_{ii}>0$ неограниченно растет (если $t\to+\infty$).

Если диагональные члены a_{ii} значительно превосходят по абсолютной величине остальные коэффициенты матрицы, то собственные числа этой матрицы близки к a_{ii}. Отсюда следует, что если диагональные члены велики, то они и определяют устойчивость.

Пример 2. Матрица уравнения гомеостата (§ 19.11) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ a_{11}h & a_{12}h & a_{13}h & a_{14}h & -j & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{21}h & a_{22}h & a_{23}h & a_{24}h & \cdot & -j & \cdot & \cdot \\ a_{31}h & a_{32}h & a_{33}h & a_{34}h & \cdot & \cdot & -j & \cdot \\ a_{41}h & a_{42}h & a_{43}h & a_{44}h & \cdot & \cdot & \cdot & -j \end{bmatrix}.$$

Если $\mu_1, \ldots, \mu_8$ — собственные числа этой матрицы, а $\lambda_1, \ldots, \lambda_4$ — собственные числа матрицы $|a_{ij}h|$, то $\lambda_p = \mu_q^2 + j\mu_q$. Если $j=0$, система должна быть неустойчивой,

так как восемь ее собственных чисел получаются извлечением квадратных корней из $\lambda_1, \ldots, \lambda_4$, причем берутся оба — как положительные, так и отрицательные — значения этих корней. Если $j \to \infty$, то система с восемью переменными и система с четырьмя переменными устойчивы или неустойчивы одновременно.

Пример 3. Фиксируя одну переменную в устойчивой системе, можно сделать систему остальных неустойчивой. Например, матрица

$$\begin{bmatrix} 6 & 5 & -10 \\ -4 & -3 & -1 \\ 4 & 2 & -6 \end{bmatrix}$$

соответствует устойчивой системе. Но, зафиксировав третью переменную, получаем систему с двумя переменными — ее матрица

$$\begin{vmatrix} 6 & 5 \\ -4 & -3 \end{vmatrix}$$

Эта система неустойчива.

Пример 4. Увеличение внутренней устойчивости одной переменной (см. пример 1) может нарушить устойчивость всей системы. Например, система с матрицей

$$\begin{bmatrix} -4 & -3 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$$

устойчива. Но она станет неустойчивой, если изменить a_{11}, сделав его меньше, чем —4,5.

Пример 5. Пусть матрица порядка $n \times n$ представлена в расчлененной форме

$$\left[\begin{array}{c:c} a & b \\ \hdashline c & d \end{array}\right]$$

и пусть матрица [a] имеет порядок $k \times k$. Если k диагональных элементов a_{ii} велики в сравнении со всеми остальными элементами матрицы, то ее собственные числа

близки к k значениям a_{ii} и $n-k$ собственным числам матрицы $[d]$. Так, матрица (соответствующая $[d]$)

$$\begin{bmatrix} 1 & -3 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

имеет собственные числа $+1{,}5 \pm 1{,}658\, i$,
а матрица

$$\begin{bmatrix} -100 & -1 & 2 & 0 \\ -2 & -100 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & 1 & -3 \\ 2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

имеет собственные числа $-101{,}39$, $-98{,}62$ и $+1{,}506 \pm \pm 1{,}720i$.

Следствие. Если система $[d]$ неустойчива, но система с четырьмя переменными устойчива, то увеличение внутренней устойчивости переменных x_1 и x_2 в конце концов приведет к неустойчивости системы в целом.

Пример 6. Сложная природа устойчивости хорошо иллюстрируется системой с матрицей

$$\begin{bmatrix} -3 & -2 & 2 \\ -6 & -5 & 6 \\ -5 & 2 & -4 \end{bmatrix}$$

в которой каждая переменная в отдельности и каждая пара переменных устойчивы, целое же — неустойчиво.

Вероятность устойчивости

20.10. Понятие «вероятность устойчивости системы» получает точный смысл только после того, как определена система, для нее определено понятие устойчивости, а затем указано пространство, из которого берутся выборки. Вообще различных определений «вероятности

устойчивости» слишком много, чтобы можно было изучать все их здесь. При необходимости каждое из них должно быть рассмотрено отдельно.

Для нас представляет интерес вероятность устойчивости *линейной* системы, когда коэффициенты ее матрицы являются случайными числами. Это приводит нас к следующей задаче.

Элементами матрицы порядка $n \times n$ являются вещественные числа, случайно выбранные из генеральной совокупности с заданным распределением. Найти вероятность того, что все собственные числа матрицы имеют отрицательные вещественные части.

Насколько мне известно, эта задача не решена даже в таком частном случае, когда все элементы имеют одинаковые распределения, например такие простые, как нормальное e^{-x^2} или равномерное в интервале $(-a, +a)$. Так как тем не менее мне были необходимы сведения об изменении вероятности устойчивости системы при возрастании n, я произвел эмпирические испытания — для случая, когда коэффициенты матрицы являются целыми числами, равномерно распределенными между -9 и $+9$. Матрицы составлялись с помощью «Таблицы случайных чисел» Фишера и Йейтса, проверка устойчивости производилась с помощью признака Гурвица (§ 20.7). Одна из полученных матриц третьего порядка, например, имела вид

$$\begin{bmatrix} -1 & -3 & -8 \\ -5 & 4 & -2 \\ -4 & -4 & -9 \end{bmatrix}$$

В этом случае второй определитель Гурвица равен -86, и дальнейшее исследование не требуется. При $n > 3$ объем работы быстро возрастает, так как время, необходимое для исследования, растет приблизительно как n^5. Результаты произведенных испытаний сведены в табл. 6.

Мы обращаем внимание на скорость, с которой вероятность устойчивости стремится к нулю при увели-

ТАБЛИЦА 6

Порядок матрицы	Число испытаний	Число устойчивых систем	Доля устойчивых систем, %
2×2	320	77	24
3×3	100	12	12
4×4	100	1	1

чении n. Можно высказать гипотезу, что вероятность устойчивости матрицы порядка n равна $\frac{1}{2^n}$. Эта гипотеза совместима с данными таблицы ($\chi^2=4{,}53$, $P=0{,}10$). Гипотеза может быть непосредственно проверена при $n=1$ и $n=2$. К такому же выражению для вероятности можно прийти, обратив внимание на то, что проверка устойчивости матрицы порядка n по признаку Гурвица состоит из n этапов, и на каждом этапе отпадает около половины матриц. Если предположить, что знаки определителей Гурвица статистически независимы, то вероятность устойчивости системы в точности равна $\frac{1}{2^n}$.

В описанных испытаниях знаки элементов главной диагонали были равновероятно положительными и отрицательными, т. е. переменные были с одинаковой вероятностью внутренне устойчивы и неустойчивы. Поэтому интересно исследовать вероятность устойчивости системы при условии внутренней устойчивости всех ее переменных (это означает, что элементы главной диагонали равномерно распределяются между 0 и —9).

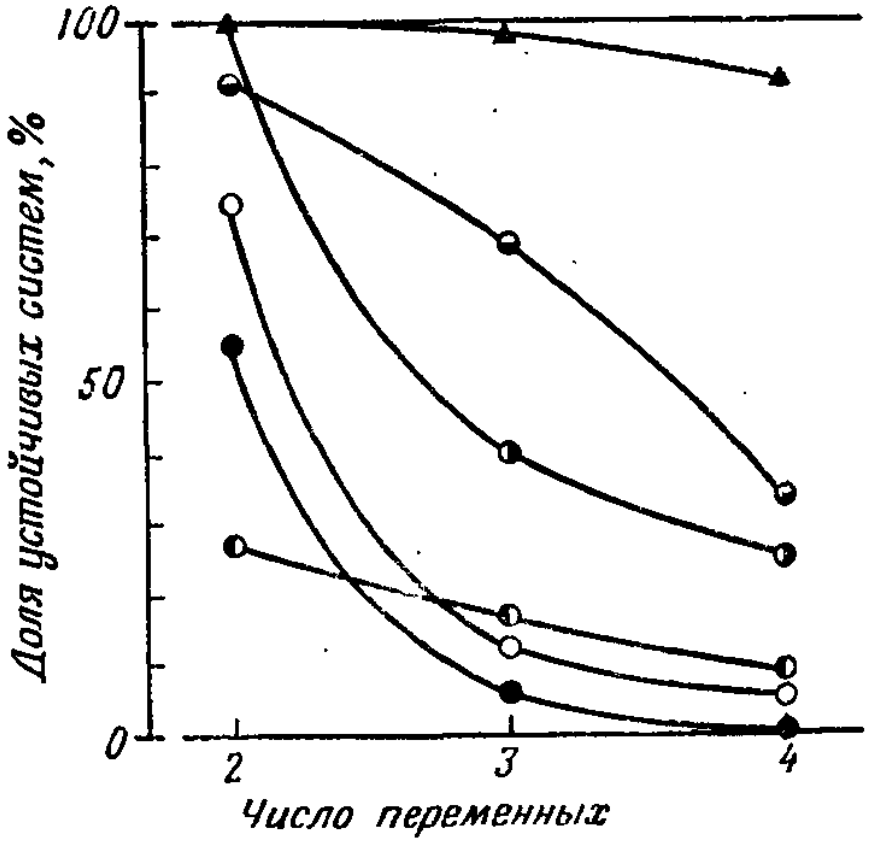
Соответствующие испытания также были проведены, и вероятность устойчивости оказалась больше, чем в первом случае. Так, при $n=1$ она равна 1 (вместо ½), при $n=2$ равна $^3/_4$ (вместо $^1/_4$). Результаты этих испытаний приведены в табл. 7. Как и в первом опыте, вероятность падает при увеличении n.

Аналогичные испытания были проведены с гомеостатом. В этих испытаниях блоки взаимодействовали между собой в условиях, определенных с помощью уни-

ТАБЛИЦА 7

Порядок матрицы	Число испытаний	Число устойчивых систем	Доля устойчивых систем, %
2×2	120	87	72
3×3	100	55	55

селекторов. Положение униселекторов оставалось неизменным в течение одного испытания, так что обычная сверхустойчивая (ультрастабильная) обратная связь была нарушена. Сначала находили долю устойчивых систем для двух блоков, а затем — при тех же общих условиях — для трех и четырех. Потом изменяли общие условия и находили новую тройку вероятностей. И так



Фиг. 66.

далее, всего 6 раз. Из-за различия в общих условиях устойчивость оказывалась иногда высокой, иногда низкой. Но в каждом случае доля устойчивых систем падала при увеличении числа взаимодействующих блоков. Результаты этих испытаний приведены на фиг. 66. Каждая

кривая проведена через точки, изображающие вероятности устойчивости системы при одних и тех же общих условиях.

Эти результаты доказывают весьма мало. Мы привели их лишь для подтверждения мысли о том, что вероятность устойчивости большой линейной системы, составленной случайным образом, мала, и, следовательно, большая система должна, вообще говоря, считаться неустойчивой — до тех пор пока не будет установлено обратное.

Глава 21

ПАРАМЕТРЫ

21.1. В двух предыдущих главах мы рассматривали определяемые состоянием системы в изолированном состоянии или с постоянным входом. Теперь мы перейдем к изучению систем, на которые влияют внешние воздействия или на вход которых подаются изменения. Иными словами, мы переходим к рассмотрению «машин с входом» (см. «Введение в кибернетику», гл. 4).

Из опыта известно, что эти изменения соответствуют введению в каноническое представление параметров, так что это представление приобретает вид

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n;\ a_1, a_2, \ldots) \quad (i = 1, \ldots, n).$$

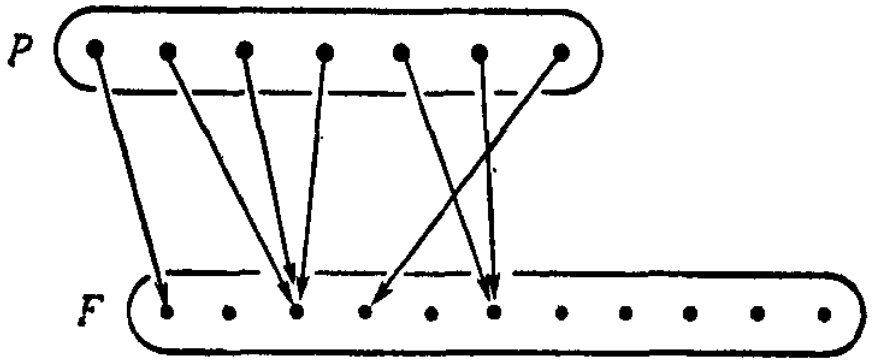
21.2. Если зафиксировать вектор a $(a_1, a_2, \ldots)$, то мы получим набор функций f_i, зависящих только от x_i, следовательно, придем к системе, определяемой состоянием. Отсюда следует, что *каждый набор значений параметров отвечает некоторому определенному полю.* Иными словами, можно *установить соответствие* между двумя множествами: 1) множеством значений a и 2) множеством полей, которыми может обладать система (см. фиг. 68); установление этого соответствия представляет собой, может быть, самый фундаментальный факт из всех, о которых шла речь в этой книге.

Можно показать, что это соответствие не взаимнооднозначно, а многозначно — в то время как одному значению вектора $a(a_1, a_2, \ldots)$ соответствует единственное поле, одному и тому же полю могут отвечать различные векторы. Таким образом, это соответствие является отображением типа Бурбаки.

Характер этого отображения наглядно представлен на фиг. 67. Каждая точка верхней линии P соответствует одному значению вектора a, каждая точка нижней линии F соответствует одному полю системы. Заметим, что 1) каждое значение вектора определяет одно поле,

2) ни один вектор не определяет более одного поля, 3) некоторые поля могут быть определены более чем одним вектором и 4) некоторые поля могут не соответствовать ни одному значению вектора a.

21.3. Если вектор a может принимать m значений (т.е. возможны m комбинаций значений параметров a_i), то система может иметь m полей. Эти m полей могут быть различными, но не исключена возможность, что некоторые из них будут совпадать между собой.



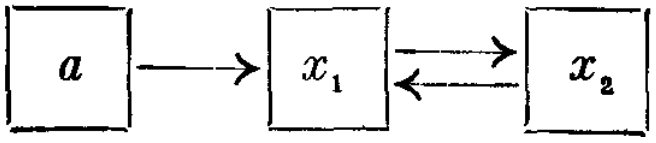
Фиг. 67.

21.4. Если параметры меняются непрерывно (т. е. сколь угодно малыми шагами), то во многих случаях соответствующие изменения в поле малы. Но возможно также, что сколь угодно малому изменению параметров отвечает *большое* изменение поля. Иными словами, поля часто, но не всегда являются непрерывными функциями параметров.

21.5. Если параметры непосредственно воздействуют только на часть переменных, они появятся только в соответствующих f_i. Например, каноническое представление (машины с входом a)

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= f_1(x_1, x_2, a), \\ dx_2/dt &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned}\right\}$$

соответствует такой схеме непосредственных воздействий:



21.6. Вводя изменяющиеся параметры, можно учесть *любое* изменение в определяемой состоянием системе (и, следовательно, в физической или биологической «машине»), в том числе любую возможность вмешательства экспериментатора. Следовательно, если отношения между переменными системы $\dot{x}=f(x)$ изменились так, что она получила вид $\dot{x}=\varphi(x)$, то это изменение можно представить как результат изменения параметра α в единой системе $\dot{x}=\psi(x;\alpha)$, так чтобы, например, при $\alpha=1$ получить $f(x)\equiv\psi(x;1)$, а при $\alpha=2$ получить $\varphi(x)\equiv\psi(x;2)$.

Применим этот метод к процессу, описанному в § 8.11, где магниты двух блоков были соединены легкой стеклянной нитью, так что были вынуждены колебаться вместе. Мы покажем, что соединение и разъединение магнитов эквивалентно изменению параметра, принимающего одно из двух значений.

Предположим, что в опыте участвуют блоки x_1, x_2 и x_3 и мы соединяем магниты первого и второго блоков. До соединения уравнения имели вид (см. § 19.11)

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3,\\ dx_2/dt &= a_{21}x_1+a_{22}x_2+a_{23}x_3,\\ dx_3/dt &= a_{31}x_1+a_{32}x_2+a_{33}x_3. \end{aligned}\right\}$$

После соединения x_1 и x_2 эти переменные принимают одинаковые значения и одно из них, например x_2, можно исключить из системы. Но x_2 продолжает действовать на другие переменные и на нить, соединяющую ее с x_1. Уравнения поэтому принимают вид

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= (a_{11}+a_{12}+a_{21}+a_{22})\,x_1+(a_{13}+a_{23})\,x_3,\\ dx_3/dt &= \qquad\qquad (a_{31}+a_{32})\,x_1+\qquad a_{33}x_2. \end{aligned}\right\}$$

Легко убедиться, что если система содержит параметр b и ее уравнения имеют вид

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= \{a_{11}+b\,(a_{12}+a_{21}+a_{22})\}\,x_1+(1-b)\,a_{12}x_2+\\ &\qquad\qquad +(a_{13}+ba_{23})\,x_3,\\ dx_2/dt &= \qquad\qquad a_{21}x_1+a_{22}x_2\quad+a_{23}x_3,\\ dx_3/dt &= \qquad (a_{31}+ba_{32})\,x_1+(1-b)\,a_{32}x_2\quad+a_{33}x_3, \end{aligned}\right\}$$

то при $b=0$ получим уравнение, отвечающее системе с разъединенными магнитами, а при $b=1$ — с соединенными. (Конечно, эта система — не единственная система, обладающая этим свойством.)

21.7. Мы будем говорить, что переменная x_k ведет себя как постоянная функция, если выполняется одно из следующих условий (легко показать их эквивалентность):

1) переменная, как функция от времени, сохраняет начальное значение x_k^0;

2) в канонических уравнениях $f_k(x_1, \ldots, x_n)$ тождественно равно нулю;

3) в уравнениях § 19.7 $F_k(x_1^0, \ldots, x_n^0; t) \equiv x_k^0$.

(Предполагается заданной некоторая область фазового пространства.)

Все переменные системы, определяемой состоянием, кроме ступенчатых и постоянных функций, мы будем называть главными переменными системы.

Теорема: *Подсистема главных переменных системы, определяемой состоянием, также образует систему, определяемую состоянием, если только ступенчатые функции не меняют своих значений.*

Предположим, что $x_1, \ldots, x_k$ — постоянные и ступенчатые функции системы, а $x_{k+1}, \ldots, x_n$ — ее главные переменные. Канонические уравнения системы имеют вид

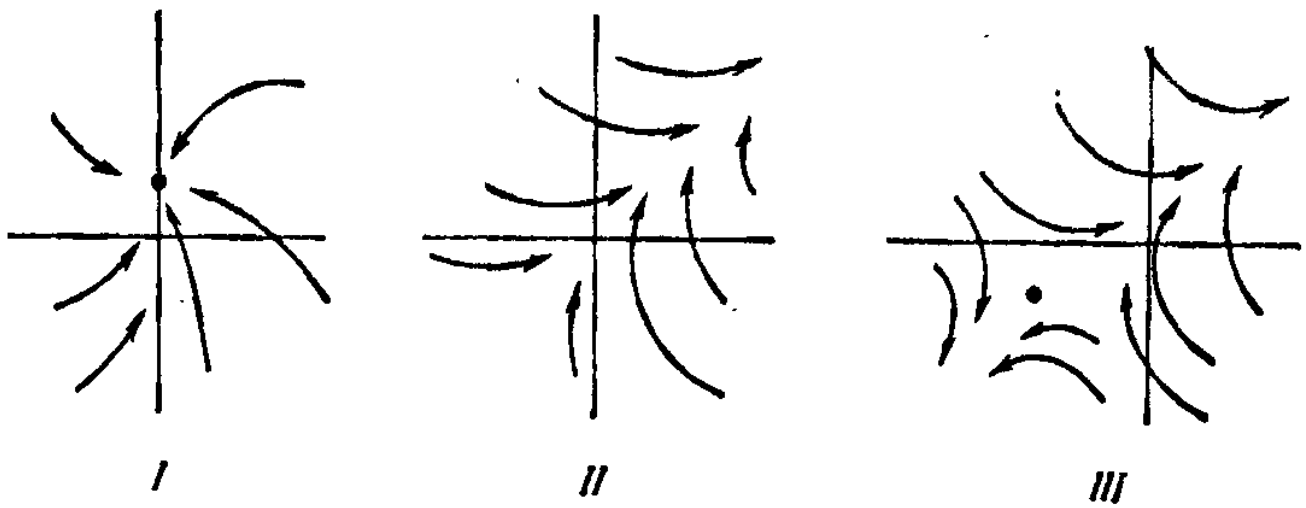
$$\left.\begin{aligned} &dx_1/dt=0,\\ &\ldots\ldots\\ &dx_k/dt=0,\\ &dx_{k+1}/dt=f_{k+1}(x_1, \ldots, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_n),\\ &\ldots\ldots\\ &dx_n/dt=f_n(x_1, \ldots, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_n). \end{aligned}\right\}$$

Интегрируя первые k уравнений, получаем $x_1=x_1^0, \ldots, x_k=x_k^0$, а подставляя полученные значения в остальные уравнения, приходим к системе

$$\left.\begin{aligned} &dx_{k+1}/dt=f_{k+1}(x_1^0, \ldots, x_k^0, x_{k+1}, \ldots, x_n),\\ &\ldots\ldots\\ &dx_n/dt=f_n(x_1^0, \ldots, x_k^0, x_{k+1}, \ldots, x_n). \end{aligned}\right\}$$

В этой системе $x_1^0, \ldots, x_k^0$ — постоянные, не зависящие от времени. Поэтому уравнения имеют каноническую форму относительно $x_{k+1}, \ldots, x_n$. Следовательно, эта система является системой, определяемой состоянием, в любом интервале времени, не содержащем точек изменения $x_1, \ldots, x_k$.

Обычно выбор переменных, образующих систему, определяемую состоянием, зависит от фактических отношений, существующих в реальной «машине», и наблюдатель не может изменить их, не внося изменений



Фиг. 68. Три поля в плоскости (x_1, x_2), отвечающие значениям параметра $a = 0$ (I), $a = 1$ (II) и $a = 2$ (III).

в саму «машину». Из теоремы, однако, следует, что наблюдатель может по своему желанию включать постоянные функции в определяемую состоянием систему или исключать их, и при этом тип системы не изменится. Иными словами, предложения «параметр a сохраняет постоянное значение a_0» и «система содержит переменную a, которая, как постоянная функция, равна своему начальному значению a^0»,— просто два способа выражения одной и той же мысли.

21.8. Оказывая влияние на поле, изменение параметра влияет также на устойчивость линий поведения системы. Например, рассмотрим системы

$$dx_1/dt = -x_1 + ax_2, \quad dx_2/dt = x_1 - x_2 + 1.$$

Полагая последовательно $a = 0$, 1 и 2, получим три поля, изображенные на фиг. 68.

Когда $a=0$, существует устойчивое состояние равновесия в точке $x_1=0$, $x_2=1$. При $a=1$ состояния равновесия нет. При $a=2$ существует неустойчивое состояние равновесия в точке $x_1=-2$, $x_2=-1$. В этом случае каждому значению параметра a отвечает свое поле (причем различным значениям параметра отвечают различные поля).

Объединенные системы

21.9. (Основные положения, относящиеся к объединенным системам, рассмотрены во «Введении в кибернетику», § 4/7. Здесь мы будем говорить только о непрерывных системах.)

Простой физический акт соединения двух машин, естественно, находит свое отражение в математическом аппарате. Это значительно легче показать в канонических уравнениях, чем в уравнениях § 19.7.

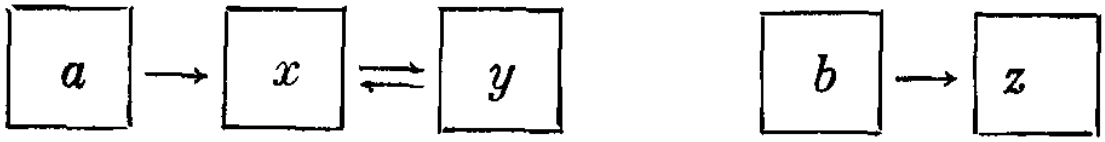
Конечно, можно было бы просто написать систему уравнений, включающую все переменные, и ввести параметр a, принимающий одно значение, когда части системы соединены, и другое, когда они разъединены. Однако это ничего не сказало бы об истинном смысле «объединения» системы. Значительно лучше ввести в одну систему параметры, являющиеся функциями переменных второй системы (тем самым будет охарактеризовано влияние второй системы на первую). Если параметры каждой из систем являются функциями переменных другой, то это означает наличие двустороннего взаимодействия. Например, пусть мы имеем одну систему с двумя переменными:

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= f_1(x, y;\ a), \\ dy/dt &= f_2(x, y) \end{aligned}\right\}$$

и вторую с одной переменной:

$$dz/dt = \varphi(z;\ b).$$

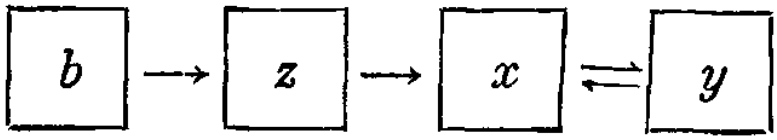
Тогда схема непосредственных воздействий имеет вид



Пусть теперь a — некоторая функция от z, например просто $a=z$. Тогда уравнения новой системы принимают вид

$$dx/dt=f_1(x, y; z),$$
$$dy/dt=f_2(x, y),$$
$$dz/dt=\varphi(z; b),$$

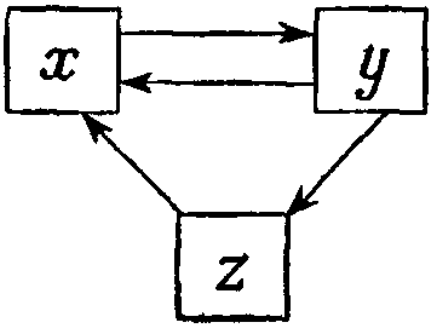
а схема непосредственных воздействий — вид



Введем, далее, еще одну связь между системами, положив $b=y$. Получим уравнения

$$\left.\begin{aligned} dx/dt&=f_1(x, y; z),\\ dy/dt&=f_2(x, y),\\ dz/dt&=\varphi(z; y)\end{aligned}\right\}$$

и такую схему непосредственных воздействий:



В этом методе установление каждой связи приводит к исключению одного параметра. Это естественно, так как каждым параметром, с помощью которого устанавливается связь с другой системой, мог бы воспользоваться экспериментатор для произвольного вмешательства. Иными словами, при нашем подходе объединение с другой системой заменяет действия экспериментатора.

Такой метод объединения не влияет на внутреннее поведение каждой из систем — оно остается прежним с той только разницей, что на него воздействуют переменные, которые раньше были для данной системы параметрами.

21.10. Теорема: *Объединенная система обладает более богатым выбором способов поведения, чем система, представляющая собой совокупность изолированных частей.*

(Это легко показать в предположении, что каждая часть имеет конечное число возможных состояний и конечное число входов. Тот же результат для бесконечного случая можно получить предельным переходом, но это потребовало бы применения специальных методов расчета.)

Предположим, что система состоит из p частей, каждая из которых может находиться в любом из s состояний (p и s конечны). Тогда число возможных состояний во всех частях системы равно s^p независимо от того, соединены или разъединены ее части. (Для удобства положим $s^p = k$.)

Если части системы соединены так, что каждое из этих k состояний может перейти в любое из k состояний (переходы каждой части ничем не ограничены, поскольку они обусловлены состояниями других частей системы и меняются при их изменении), то число возможных преобразований равно k^k.

Если же части не соединены между собой, то преобразования каждой части не зависят от состояния других. Поэтому преобразование целого составляется просто из преобразований отдельных частей. В каждой части с s состояниями может произойти s^s преобразований. Поэтому число возможных преобразований в целом равно $(s^s)^p = (s^p)^s = k^s$. Так как $s < k$, то $k^s < k^k$, что и доказывает теорему.

21.11. Пусть $X_1, \ldots, X_n$ — состояние равновесия системы

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n;\ a_1, \ldots) \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

при определенных значениях a_i, а затем эта система

присоединяется к другой, так что a_i становятся функциями от y_i. Если y_i таковы, что a_i все время сохраняют свои первоначальные значения, то $X_1, \ldots, X_n$ останется состоянием равновесия системы. В этом случае нули функций f_i и состояния равновесия x-системы не изменяются при операции соединения.

21.12. Вместе с тем устойчивость системы может грубо нарушиться. В общем случае, когда f_i произвольны, проверить это нелегко. Но в линейном случае (служащем приближением для любой непрерывной системы; см. § 20.5) это сделать нетрудно.

Приведем три примера.

Пример 1. *Две системы могут образовать устойчивое целое при одном способе соединения и неустойчивое — при другом.*

Рассмотрим две системы — каждая с одной переменной:

$$dx/dt = x + 2p_1 + p_2 \quad \text{и} \quad dy/dt = -2r - 3y.$$

Если объединить их, положив $r = x$ и $p_1 = y$, получим систему

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= x + 2y + p_2, \\ dy/dt &= -2x - 3y, \end{aligned}\right\}$$

собственные числа которой равны -1, -1; следовательно, система устойчива. Если же положить $r = x$, $p_2 = y$, объединенная система будет неустойчивой — ее собственные числа равны $+0{,}414$ и $-2{,}414$.

Пример 2. *Объединяя устойчивые системы, можно прийти к неустойчивому целому.*

Пусть даны три устойчивые системы:

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= -x - 2q - 2r, \\ dy/dt &= -2p - y + r, \\ dz/dt &= p + q - z. \end{aligned}\right\}$$

Объединим их, положив $p = x$, $q = y$, $r = z$. Полученная система имеет собственные числа $+1$, -2, -2 и, следовательно, неустойчива.

Пример 3. *Объединяя неустойчивые системы, можно прийти к устойчивому целому.* Объединим неустойчивую систему с двумя переменными

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= 3x - 3y - 3p, \\ dy/dt &= 3x - 9y - 8p \end{aligned}\right\}$$

с другой неустойчивой системой

$$dz/dt = 21q + 3r + 3z,$$

положив $q=x$, $r=y$, $p=z$. Целое устойчиво.

Система, определяемая состоянием

21.13. Теперь ясно, что имеются два пути изучения сложной (т. е. образованной из многих частей) динамической системы.

Один путь — исследовать части системы или даже отдельные переменные в изолированном состоянии, а затем посмотреть, что происходит при их соединении. «Знание» каждой части или каждой переменной означает возможность получить соответствующие уравнения канонического представления (если не в виде математической формулы, то другим способом, дающим недвусмысленный ответ). Знание способа их соединения означает, что определенные параметры каждой части могут быть исключены, так как они являются известными функциями переменных других частей. Таким образом можно получить каноническое представление целого. Линии поведения целого могут быть получены интегрированием этого представления. Итак, мы можем идти от эмпирического изучения частей и способа их соединения к *последующему* знанию целого.

Другая возможность — сразу исследовать целое и его линии поведения и в результате получить функции, приведенные в § 19.7. Их дифференцирование (см. следствие в § 19.9) дает каноническое представление всей системы и, следовательно, представления ее частей,

если другие переменные рассматривать как параметры. Таким образом, мы можем начинать с эмпирического изучения целого, а *затем* получать сведения о частях системы и способе их соединения.

21.14. Теперь становится ясно, почему системы, определяемые состоянием, и их канонические представления занимают такое важное место в теории «машин». Если система определяется состоянием, то с помощью первичных операций мы устанавливаем ее каноническое представление, и наше знание системы становится *полным*. Это, конечно, не означает, что мы располагаем полным знанием реальной «машины», которая породила данную систему,— это, может быть, вообще невозможно. Но это означает, что мы получили полное знание абстрактной системы — полное в том смысле, что наши предсказания становятся однозначными и достоверными, приобретают (относительную) законченность. Если болельщик перед каждым спортивным соревнованием называет победителя и его прогнозы всегда оправдываются, мы допускаем, что его знания в этой области являются полными, хотя в других областях он может быть крайне невежественным человеком.

Итак, в соответствии с нашей основной стратегией (§ 2.17) исследование систем, определяемых состоянием, должно занимать ключевое место в теории «машин», так как эта форма исследования является законченной и полной. Прочие же формы теории, применяемые при изучении других случаев, могут быть найдены как следствия неумолимого вопроса: «как быть, если в том или ином отношении мое знание не является полным?»

Так мы приходим к системам, которые столь часто встречаются в биологическом мире — это системы, переменные которых не поддаются прямому наблюдению; системы, в которых мы не имеем возможности различить все состояния; системы, которые можно наблюдать лишь в определенные моменты времени; и так далее.

21.15. Понятие системы, определяемой состоянием, идентично введенному Шенноном понятию «бесшумного канала», определяемого как нечто, имеющее состояние

α и вход x, так что каждое α_n при данном входе x_n переходит в новое, вполне определенное состояние α_{n+1}, зависящее только от x_n и α_n:

$$\alpha_{n+1}=g(x_n, \alpha_n).$$

Несмотря на совершенно иную форму, это уравнение эквивалентно нашему каноническому представлению, так как оно утверждает, что заданные значения параметров x и начального состояния системы полностью определяют следующее ее состояние. Если бы инженер связи понаблюдал немного за биологами и психологами, он сказал бы, что они, по-видимому, предпочитают иметь дело с бесшумными системами. И это его замечание не было бы банальностью, так как именно бесшумные системы открывают простор для строгого исследования.

Глава 22

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОСТОЯНСТВОМ

22.1. Переменная называется **ступенчатой функцией** в определенном интервале наблюдения, если ее изменения в этом интервале происходят мгновенными и конечными скачками в некоторые дискретные моменты (число которых конечно), тогда как между скачками ее значение постоянно.

22.2. Для того чтобы установить основные свойства ступенчатой функции в некоторой системе, рассмотрим следующий пример.

На невесомой пружине подвешен грузик массы m. Если пружину натянуть слишком сильно, то она оборвется и грузик будет свободно падать. Пусть для увеличения длины пружины на 1 *см* требуется сила k *дин* и такая же сила противоположного направления требуется для сжатия пружины. Движение грузика будем характеризовать расстоянием x по вертикали сверху вниз от положения пружины в отсутствие грузика.

Если в начальный момент времени поместить грузик выше или ниже точки покоя, его движение будет описываться уравнением

$$\frac{d}{dt}\left(m\frac{dx}{dt}\right)=gm-kx, \tag{1}$$

где g — ускорение силы тяжести. Это уравнение можно привести к канонической форме подстановкой $x=x_1$, $dx/dt=x_2$:

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt&=x_2,\\ dx_2/dt&=g-\frac{k}{m}x_1. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

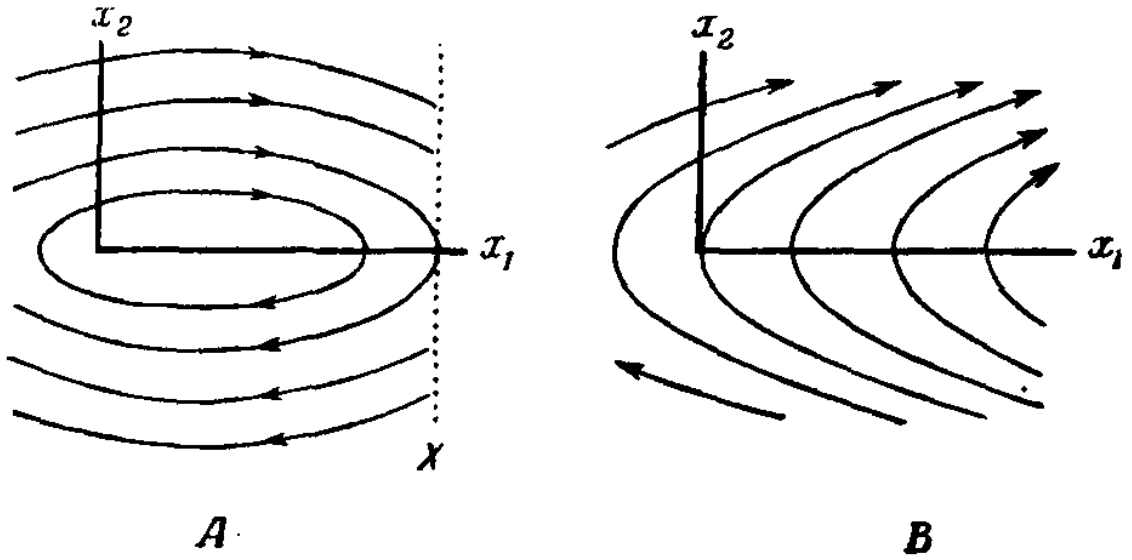
Если пружина оборвется, k станет равным нулю и

уравнения приобретают вид

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2, \\ dx_2/dt &= g. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Предположим, что пружина обрывается при растяжении на длину X.

Поведение такой системы можно изучать двумя эквивалентными способами. Мы можем рассматривать k как параметр системы (x_1, x_2), изменение которого переводит уравнения (2) в уравнения (3) (см. § 21.1). При



Фиг. 69. Поле системы (x_1, x_2) до разрыва пружины (A) и после разрыва (B).

Правее пунктирной линии поля не существует, так как при растяжении на длину X пружина разрывается.

этом поле A системы будет переходить в поле B (фиг. 69).

При другом подходе мы можем рассматривать x_1, x_2 и k как три переменные некоторой системы. Это — определяемая состоянием система, обладающая единственным полем, изображенным на фиг. 70. При таком подходе ступенчатая функция должна быть введена в канонические уравнения. Это можно сделать, например, так:

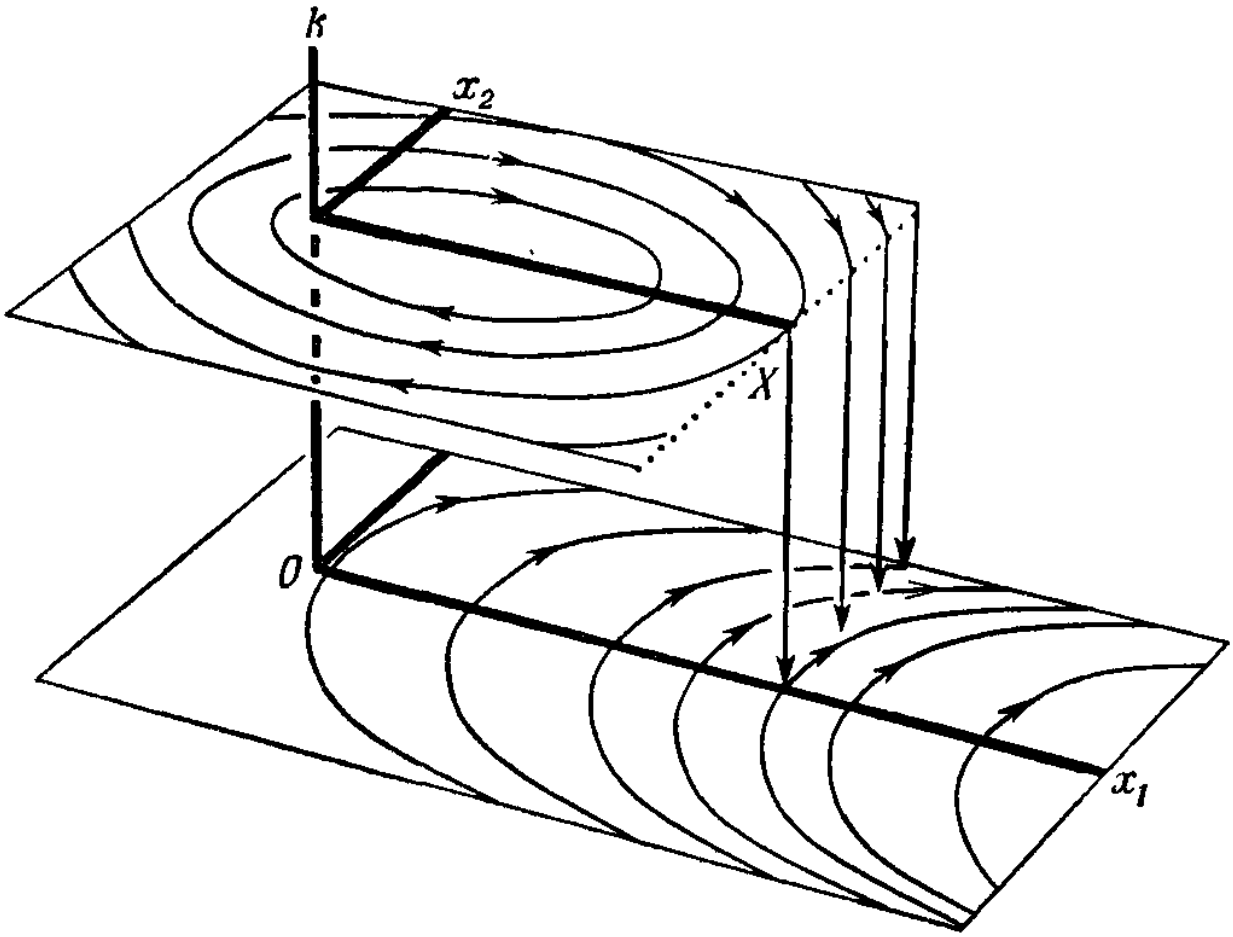
$$dk/dt = q\left(\frac{K}{2} + \frac{K}{2}\,\mathrm{th}\,\{q\,(X - x_1)\} - k\right), \qquad (4)$$

где K — начальное значение переменной k, а q — большое положительное число. При $q \to \infty$ поведение k стремится к ступенчатой функции.

Другая возможность — использование δ-функции Дирака, определенной следующими условиями: $\delta(u)=0$ при $u\neq 0$, а при $u=0$ стремится к бесконечности так, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(u)du=1.$$

Если $du/dt=\delta\{\varphi(u, v, \ldots)\}$, то du/dt будет равно нулю всюду, кроме значений u, v, ..., обращающих φ в нуль.



Фиг. 70. Поле системы с тремя переменными.

При этих значениях $\delta(u)$ мгновенно становится бесконечно большой и u меняется конечным скачком. Практическая польза этих представлений невелика, однако они имеют большую теоретическую ценность, показывая, что ступенчатые функции *можно* включить в каноническое представление системы.

22.3. В системе, определяемой состоянием, ступенчатая функция меняет свое значение только в определенных состояниях системы, называемых критическими

На фиг. 70, например, такими состояниями для ступенчатой функции k, имеющей начальное значение K, будут все точки плоскости $k=K$ (верхняя плоскость), лежащие справа от $x_1=X$.

Вообще говоря, критические состояния могут быть расположены произвольно. Однако обычно это расположение непрерывно. В этом случае существует **критическая поверхность**

$$\varphi(k, x_1, \ldots, x_n)=0,$$

которая при данном k отделяет критические состояния от некритических. Например, на фиг. 70 эта поверхность пересекается с плоскостью $k=K$ по линии $x_1=X$. (Плоскость $k=0$ не пересекается с критической поверхностью, так как в нашей системе нет состояний, в которых k менялось бы после того, как стало равным нулю.)

Обычно φ является функцией только некоторых переменных системы. Так, открытое или закрытое положение телеграфного реле зависит только от двух переменных — наличия тока в катушке и предыдущего состояния.

Такие переключения и критические состояния можно наблюдать в гомеостате. Критическая поверхность (в первом приближении) представляет собой квадрат, куб или четырехмерный куб в фазовом пространстве — в зависимости от того, сколько используется блоков (два, три или четыре). Критические состояния расположены в пространстве вне этой поверхности. Из-за наличия люфта в переключателях критические поверхности для включения несколько не совпадают с поверхностями для выключения.

Системы с несколькими полями

22.4. Предположим, что в предыдущем примере какая-то неизвестная нам сила время от времени внезапно рвет пружину и так же внезапно восстанавливает ее,

Если бы за время наблюдения произошло много таких актов, мы сделали бы вывод, что эта определяемая состоянием система попеременно обладает то полем A, то полем B (см. фиг. 69).

Такую систему можно назвать системой с двумя полями. Аналогично, если параметры системы могут принимать r различных комбинаций значений, внезапно сменяющих друг друга в силу неизвестных нам причин, мы можем сказать, что система имеет r полей.

22.5. С определенной осторожностью мы можем провести это рассуждение в обратном направлении, используя соответствие, описанное в § 21.2. Действительно, хотя число полей не определяет числа наборов значений параметров, но оно дает для этого числа оценку *снизу*. Следовательно, поле, меняющееся как первый ряд букв в § 9.13, требует, как минимум, четыре значения параметров, а поле, меняющееся подобно второму ряду,— не менее 15.

Если, изучая поведение системы, наблюдатель обнаруживает, что ее поле остается неизменным, он, конечно, должен заключить, что минимальное число наборов значений параметров равно единице. Если в поле системы произошло внезапное изменение и получившееся поле более не меняется, то минимальным числом наборов для нового поля будет опять единица. В этом случае экспериментатор вправе сделать вывод (§ 7.13), что параметры системы должны вести себя *по меньшей мере* как ступенчатые функции, так как постоянные функции не могли бы привести к происшедшему изменению, а частично постоянные функции дали бы излишнее разнообразие полей.

Сверхустойчивая система

22.6. В § 7.26 было уже дано определение и описаны простейшие свойства сверхустойчивых (ультрастабильных) систем. Мы, однако, дадим новое, чисто математи-

ческое определение, так как это уменьшит возможность недоразумений и создаст основу для количественного исследования сверхустойчивости.

Сверхустойчивая система должна состоять из главных переменных x_i и ступенчатых функций a_i, причем целое представляет собой систему, определяемую состоянием:

$$dx_i/dt = f_i(x;\ a) \qquad (i=1, \ldots, n),$$
$$da_i/dt = g_i(x;\ a) \qquad (i=1,\ 2,\ \ldots).$$

Функции g_i должны иметь вид, аналогичный упомянутому в § 22.2. Репрезентативная точка, соответствующая начальному состоянию системы, расположена внутри критической поверхности $\varphi(x)=0$ — поверхности, на которой изменяются значения ступенчатых функций. В момент изменения новые значения a представляют собой случайные выборки из некоторого заданного распределения.

Уравнения главных переменных гомеостата (§ 19.11) имеют вид

$$dx_i/dt = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 \quad (i=1,\ 2,\ 3,\ 4).$$

Здесь a_{ij} — ступенчатые функции, значения которых равномерно распределены между -1 и $+1$. Критические поверхности этих ступенчатых функций приближенно описываются уравнениями $|x|=\frac{\pi}{4}$, причем каждая ступенчатая функция a_{ij} меняет свое значение только тогда, когда соответствующее x_j пересекает критическую поверхность.

Так как a_{ij} меняются скачками, то, насколько мне известно, аналитическое интегрирование этих дифференциальных уравнений невозможно. Но описание системы, уравнения и указание порядка случайных выборок, характеризующих положение униселекторов, однозначно определяют поведение x_i и a_{ij}. Поэтому поведение системы может быть изучено с любой степенью точности с помощью численных методов.

22.7. Сколько в среднем требуется проб для отыскания окончательного поля? Если для сверхустойчивой системы существует вероятность p того, что новое поле главных переменных будет устойчиво, и вероятности полей независимы, то среднее число полей (включая окончательное) равно $1/p$. Это видно из следующего рассуждения. Первое поле будет окончательным с вероятностью p и не будет окончательным с вероятностью $q=1-p$. В последнем случае второе поле также с вероятностью p будет окончательным и с вероятностью q — нет, так что общая вероятность того, что оно будет окончательным, равна pq, а вероятность того, что произойдет переход к третьему полю, равна q^2. Аналогично вероятность того, что окончательным будет u-е поле, равна pq^{u-1}. Отсюда среднее число необходимых проб равно

$$\frac{p+2pq+3pq^2+\ldots+upq^{u-1}+\ldots}{p+pq+pq^2+\ldots+pq^{u-1}+\ldots}=\frac{1}{p}.$$

Частичная независимость

22.8. Мы изучали действие переменных друг на друга, наблюдая поведение всей системы в целом. Но нельзя ли сказать что-нибудь о непосредственном влиянии одной переменной на другую? Иными словами, можно ли распределить причину изменения одной переменной между другими переменными системы, сказав, что такая-то часть его вызвана одной переменной, а такая-то часть — другой? Вообще говоря, нельзя — **изменение отдельных переменных зависит от поведения всей системы в целом и не может быть разделено.** Например, если $dx/dt=\sin x+xe^y$, причем $x=1/2$, $y=2$, то за 0,01 единицы времени величина x возрастает на 0,042, но это число нельзя разбить на две части, так чтобы одна была обусловлена величиной x, а другая — величиной y. Только в отдельных простых случаях изменение можно представить в виде *суммы* таких слагаемых, но в био-

логических системах такие случаи встречаются крайне редко, хотя они не являются исключительными в теоретической физике.

22.9. Пусть дана система, определяемая состоянием, ее поле, линия поведения в нем и участок P этой линии. Дано также, что x_p — частично постоянная функция. Тогда эквивалентны следующие пять утверждений, так что истинность (или ложность) одного из них влечет за собой истинность (или ложность) всех других:

1) x_p есть константа (недействующая переменная);

2) $dx_p/dt \equiv 0$;

3) $f_p(\ldots, x_p, \ldots) \equiv 0$;

4) $x_p = x_p^0$ независимо от t;

5) $F_p(x^0; t) \equiv x_p$ при таких t, которые не выводят линию за пределы участка P.

(При этом все, естественно, относится к заданному участку P.) Эквивалентность легко следует из свойств уравнений § 19.9 и их интегралов.

22.10. Пусть дана система, определяемая состоянием, и два начальные состояния, отличающиеся только значениями x_j^0 (разность равна Δx_j^0). Если изменение x_k одинаково в обоих случаях, мы говорим, что x_k **не зависит** от x_j. Аналитически это выглядит так:

$$F_k(x_1^0, \ldots, x_j^0, \ldots; dt) = \\ = F_k(x_1^0, \ldots, x_j^0 + \Delta x_j^0, \ldots; dt). \qquad (1)$$

Другими словами, x_k не зависит от x_j, если поведение x_k не меняется от того, что в начальном состоянии x_j^0 изменено на Δx_j^0. (Не путайте изменение Δx_j^0 с изменением dt.)

Это частное определение служит основой для дальнейших обобщений. В практических приложениях уравнение (1) справедливо при любых Δx_j^0 (возможно, внутри

некоторой конечной области) и для любых начальных состояний x_k (также, возможно, внутри некоторой конечной области). В этом случае независимость x_k от x_j определяется условием

$$\frac{\partial}{\partial x_j^0} F_k(x^0;\ t) \equiv 0.$$

Конечно, как и всегда, должна быть указана область, в которой выполняется данное соотношение (это указание может быть явным или подразумеваться).

Схемы воздействий

22.11. Между схемой непосредственных воздействий и каноническим представлением системы существует простая связь. Отправляясь от прагматической и эмпирической точки зрения, высказанной в § 2.7, мы предположим, что наблюдатель исследует систему с помощью первичных операций. В результате он получает функции F_l (§ 19.7), затем f_i, а также схемы непосредственных воздействий (§ 4.12). При этом в схеме *непосредственных* воздействий стрелка будет идти от x_j к x_k тогда и только тогда, когда в каноническом представлении x_j явно входит в f_k. (Область изменения аргументов предполагается заданной.)

22.12. Можно показать, что в схеме *конечных* воздействий стрелка от x_j к x_k проводится в том и только в том случае, когда в уравнении § 19.7 x_j^0 явно входят в F_k (в некоторой заданной области).

(Более полно эти вопросы были рассмотрены в первом издании, но сейчас необходимости в их подробном изложении нет.)

22.13. Полезно заметить, что если даны n точек, то при любом числе произвольно проведенных стрелок полученную схему можно трактовать как схему непосредственных воздействий. Этого нельзя сказать о схеме конечных воздействий. В самом деле, если в такой схеме ведут стрелки от p к q, а от q к r, то должна быть и стрел-

ка от p к r. Следовательно, если схема непосредственных воздействий может иметь любой вид, то схема конечных воздействий должна обладать свойством транзитивности.

22.14. Теперь мы можем строго проверить тезис, высказанный в § 12.10. На фиг. 47 дана схема непосредственных воздействий. Предполагается, что целое изолированно и представляет собой систему, определяемую состоянием. (Для краткости мы будем обозначать индексами A, B и C любые переменные из множеств A, B и C соответственно.) Тогда каноническое представление целого должно иметь вид

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_A &= f_A \quad (x_A,\ x_B), \\ \dot{x}_B &= f_B \quad (x_A,\ x_B,\ x_C), \\ \dot{x}_C &= f_C \quad (x_B,\ x_C), \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

причем x_C не входит в f_A, а x_A не входит в f_C. Докажем теперь две части теоремы.

1) Пусть B — постоянные функции (в некоторой заданной области). Обозначим совокупность их значений через β. Тогда верхнее уравнение системы (1) принимает вид

$$\dot{x}_A = f_A(x_A,\ \beta).$$

Это показывает, что система x_A определяется состоянием (пока β постоянно). Далее, интегралы F_A этих уравнений не могут содержать x_C^0, поэтому система A не зависит от системы C.

Аналогично доказывается, что C — система, определяемая состоянием и не зависящая от A. Следовательно, постоянство функций B служит барьером, превращающим A и C в не зависимые друг от друга системы, определяемые состоянием.

2) Докажем обратное. Пусть имеется взаимодействие между A и B и между B и C, но A и C непосредственно не взаимодействуют. Пусть, далее, система, составленная из A, B и C, определяется состоянием. Наконец, пусть установлено, что системы A и C независимы одна

от другой и также определяются состоянием. Что можно сказать о переменных системы B?

Отсутствие связи между A и C показывает, что каноническое представление для A должно иметь вид первой строки в системе уравнений (1):

$$\dot{x}_A = f_A(x_A, x_B).$$

Учитывая, что в этом уравнении A будет системой, определяемой состоянием, только в том случае, если значения B не меняются со временем, получим, что x_B должны быть постоянными функциями.

Литература

Ashby W. Ross, Adaptiveness and equilibrium, Journal of Mental Science, 86, 478; 1940.

Ashby W. Ross., The physical origin of adaptation by trial and error, Journal of general Psychology, 32, 13; 1945.

Ashby W. Ross., Effect of controls on stability, Nature, 155, 242; 1945.

Ashby W. Ross., Interrelations between stabilities of parts within a whole dynamic system, Journal of comparative and physiological Psychology, 40, 1; 1947.

Ashby W. Ross., The nervous system as physical machine: with special reference to the origin of adaptive behaviour, Mind, 56, 1; 1947.

Ashby W. Ross., Design for a brain, Electronic Engineering, 20, 379; 1948.

Ashby W. Ross., The stability of a randomly assembled nerve-network. Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 2, 471; 1950.

Ashby W. Ross., Can a mechanical chess-player outplay its designer? British Journal for the Philosophy of Science, 3, 44; 1952.

Ashby W. Ross., An introduction to cybernetics, London, 3rd imp., 1958.

Bourbaki N., Théorie des ensembles; facsicule de résultats, A. S. E. I. No. 1141; Paris; 1951.

Bourbaki N., Algèbre. A. S. E. I. No. 1144.

Bourbaki N., Topologie. A. S. E. I. No. 1142.

Boyd D. A., Nie L. W. Congenital universal indifference to pain, Archives of Neurology and Psychiatry, 61, 402; 1949.

Cannon W. B. The wisdom of the body. London, 1932.

Carey E. J., Massopust L. C., Zeit W., Haushalter E., Schmitz J. Experimental pathologic effects of traumatic shock on motor end plates in skeletal muscle, Journal of Neuropathology and experimental Neurology, 4, 134; 1945.

Cowles J. T. Food-tokens as incentives for learning by chimpanzees. Comparative Psychology Monographs, 14, No. 71; 1937—1938.

Dancoff S. M., Quastler H. Information content and error rate of living things. In «Information theory in biology», edited H. Quastler. Urbana, 1953.

Girden E., Culler E. Conditioned responses in curatised striate muscle in dogs, Journal of comparative Psyshology, 23, 261; 1937.

Grant W. T. Graphic methods in the neurological examination: wavy tracings to record motor control, Bulletin of the Los Angeles Neurological Society, 12, 104; 1947.
Grindley G. C. The formation of a simple habit in guinea-pigs, British Journal of Psychology, 23, 127; 1932—1933.
Harrison R. G. Observations on the living developing nerve fiber, Proceedings of the Society for experimental Biology and Medicine, 4, 140; 1906—1907.
Hilgard E. R., Marquis D. G. Conditioning and learning. New York, 1940.
Holmes S. J. A tentative classification of the forms of animal behavior. Journal of comparative Psychology, 2, 173; 1922.
Humphrey G. The nature of learning. London, 1933.
Hurwitz A. Über die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reelen Teilen besitzt. Mathematische Annalen, 46, 273; 1895.
Jennings H. S. Behavior of the lower organisms. New York, 1906.
Lashley K. S. Nervous mechanisms in learning. In «The foundations of experimental psychology», edited C. Murchison. Worcester, 1929.
Levi G. Ricerche sperimentali sovra elementi nervosi sviluppati «in vitro». Archiv für experimentelle Zellforschung, 2, 244; 1925—1926.
Lorente De No, R. Vestibulo-ocular reflex arc. Archives of Neurology and Psychiatry, 30, 245; 1933.
McDougall W. Psychology. New York, 1912.
Marina A. Die Relationen des Palae-encephalons (Edinger) sind nicht fix. Neurologisches Centralblatt, 34, 338; 1915.
Morgan C. Lloyd. Habit and instinct. London, 1896.
Mowrer O. H. An experimental analogue of «regression» with incidental observations on «reaction-formation». Journal of abnormal and social Psychology, 35, 56; 1940.
Müller G. E., Pilzecker A. Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis. Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Ergänzungsband No. 1; 1900.
Nyquist H. Regeneration theory. Bell System technical Journal, 11, 126; 1932.
Parker G. The evolution of man. New Haven, 1922.
Pauling L. In Cerebral mechanisms in behavior, edited Lloyd A. Jeffress. New York, 1951.
Pavlov I. P. Conditioned reflexes. Oxford, 1927.
Riguet J. Sur les rapports entre les concepts de machine de multipole et de structure algébrique. Comptes rendues de l'Academie des Science, 237, 425; 1953.
Robinson E. S. Some factors determining the degree of retroactive inhibition. Psychological Monographs, 28, No. 128; 1920.

Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J. Behavior, purpose and teleology. Philosophy of Science, 10, 18; 1943.

Shannon C. E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana, 1949.

Sherrington C. S. The integrative action of the nervous system, New Haven, 1906.

Skaggs E. B. Further studies in retroactive inhibition. Psychological Monographs, 34, No. 161; 1925.

Sommerhoff G. Analytical biology. Oxford, 1950.

Speidel C. C. Activities of amoehoid growth cones, sheath cells, and myelin segments as revealed by prolonged observation of individual nerve fibers in frog tadpoles. American Journal of Anatomy, 52, 1; 1933.

Speidel C. C. Effects of metrazol on tissues of frog tadpoles with special reference to the injury and recovery of individual nerve fibers. Proceedings of the American Philosophical Society, 83, 349; 1940.

Sperry R. W. Effect of crossing nerves to antagonistic limb muscles in the monkey. Archives of Neurology and Psychiatry, 58, 452; 1947.

Temple G. General principles of quantum theory. London, 2 nd ed., 1942.

Wiener N. Cybernetics. New York, 1948.

Wolfe J. B. Effectiveness of token-rewards for chimpanzees. Comparative Psychology Monographs, 12, No. 60; 1935—1936.

Young J. Z. In «Evolution». edited G. R. de Beer. Oxford, 1938.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию 5
Предисловие автора ко второму изданию 15
Из предисловия автора к первому изданию 17

Глава 1. **Проблема** 19
Рефлекторное поведение и поведение, приобретенное путем научения 20
Взаимоотношения между частями 25
Генетический контроль функции мозга 28
Ограничения в использовании употребляемых понятий 29
Сознание 32
Проблема 34

Глава 2. **Динамические системы** 36
Переменная и система 38
Метод «операций» (рабочий прием) 41
Фазовое пространство и поле 46
Естественная система 52
Стратегия исследования сложных систем 57

Глава 3. **Организм как машина** 60
Характеристика поведения 60
Организм и среда 68
Существенные переменные 76

Глава 4. **Стабильность** 79
Схема непосредственных воздействий 87
Обратная связь 90
Поиск цели 93
Стабильность и целое 95

Глава 5. **Адаптация как стабильность** 98
Гомеостаз 98
Обобщенное понятие гомеостаза 103
Выживание 108
Стабильность и координация 111

Глава 6. **Параметры** 117
Параметр и поле 118

Раздражители 122
Соединение динамических систем 124
Параметр и стабильность 126
Равновесные состояния части и целого 127
Глава 7. **Ультрастабильная система** 129
Необходимые предпосылки адаптации 129
Следствия двойной обратной связи 137
Ступенчатые функции 139
Системы, содержащие ступенчатые механизмы 147
Ультрастабильная система 154
Глава 8. **Гомеостат** 156
Гомеостат как механизм, способный к адаптации . . 162
Дрессировка 170
О некоторых мнимых дефектах 181
Глава 9. **Ультрастабильность в живом организме** . . 185
Ступенчатые механизмы в организме 187
О возможной молекулярной основе памяти 191
Необходимы ли ступенчатые механизмы? 193
Формы обратной связи 196
Контроль цели 198
Генотип и ультрастабильность 201
Выводы 204
Глава 10. **Повторяющаяся ситуация** 206
Повторяющаяся ситуация 208
Аккумулятор адаптаций 211
Глава 11. **Система с полной взаимосвязью элементов** . . 219
Время, необходимое для адаптации 219
Кумулятивная адаптация 227
Глава 12. **Вре́менная независимость** 233
Независимость 235
Следствия постоянства переменных в отдельных подсистемах 241
Следствия стабильности отдельных подсистем 245
Глава 13. Система с отдельными стабильными подсистемами 250
Движение к равновесию 254
Дисперсия 260
Локализация в полистабильной системе 263

Глава 14. **Повторные раздражители и привыкание** . . 268
Привыкание 269
Слабые возмущения 276
Глава 15. **Адаптация в итеративных системах и системах с последовательным соединением частей** . . 279
Адаптация в итеративных системах 285
Последовательная адаптация 289
Глава 16. **Адаптация в мультистабильной системе** . . 296
Среда с большим числом связей 296
Среда с малым числом связей 299
Ретроградное торможение 308
Глава 17. **Вспомогательные регуляторные механизмы** 313
Связи между частями мозга 313
Вспомогательные регуляторные механизмы 321
Распределение обратных связей 325
Глава 18. **Усиленная адаптация** 330
Отбор в системе, определяемой состоянием 330
Усиленная адаптация 335
Резюме 338
Приложения 341
Глава 19. **Системы, определяемые состоянием** 343
Логика механизма 344
Каноническое представление 347
Преобразования канонического представления . . . 353
Глава 20. **Устойчивость** 358
Вероятность устойчивости 365
Глава 21. **Параметры** 370
Объединенные системы 375
Система, определяемая состоянием 379
Глава 22. **Явления, связанные с постоянством** . . . 382
Системы с несколькими полями 385
Сверхустойчивая система 386
Частичная независимость 388
Схемы воздействий 390
Литература 393

У. Росс Эшби

Конструкция мозга

Редактор *А. Б. ЛЕВИНА*
Художник *Н. С. Хмелевская*
Художественный редактор
Н. В. Зотова
Технический редактор
В. П. Рыбкина
Корректор *А. А. Толкушкин*

Сдано в производство 24/IV-62 г.
Подписано к печати 4/VIII-62 г.
Бумага 84 × 108 1/32 6,3 бум. л.
20,5 печ. л. Уч.-изд. л. 17,3.
Изд. № 4/0461. Цена 1 р. 36 к.
Заказ № 2968

* * *

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва, 1-й Рижский пер., 2

* * *

Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова
Московского городского совнархоза
Москва, Ж-54, Валовая, 28