

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»

М.Ю. КАСАТКИН, В.В. КОРОБКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

*Рекомендовано учебно-методической комиссией и
Учёным советом биологического факультета СГУ
для студентов, обучающихся по специальности «Биология»*

САРАТОВ
2017

Введение

С процессом моделирования и различными моделями человек начинает сталкиваться уже с самого раннего детства. Само понятие игра есть не что иное, как моделирование некоторых аспектов действительности, а игрушки можно рассматривать в качестве моделей соответствующих объектов. Несмотря на это, несколько десятилетий назад слова «модель», «моделирование» были известны только узкому кругу высокопрофессиональных специалистов, связанных с исследованием сложных физических и природных процессов или с созданием сложных технических объектов.

Сегодня, благодаря компьютерным информационным технологиям, расширившим возможности моделирования, слова «модель» и «моделирование» используются в обычной жизни и уже не воспринимаются как узкоспециальные термины. Становится трудно представить научно-исследовательскую и серьезную проектную деятельность без использования методологии и средств построения и использования моделей. Повышенный интерес в настоящее время к теме моделирования вызван тем значением, которое метод моделирования получил в современной науке, и в особенности в таких ее разделах, как физика, химия, биология, кибернетика, не говоря уже о многих технических науках.

Можно с уверенностью утверждать, что моделирование оформилось в самостоятельную междисциплинарную область знаний со своими объектами, закономерностями, подходами и методами исследования.

Материал, приведенный в данном учебном пособии, может быть использован в преподавании и изучении ряда дисциплин: современных концепций естествознания, физиологии человека и животных, физиологии растений, биотехнологии, математических методов и моделей в биологии, экологии, биофизике.

Глава 1

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1 История моделирования как метода познания

Моделирование как познавательный приём неотделимо от развития знания. Человечество в своей деятельности (научной, образовательной, технологической, художественной и др.) постоянно создает и использует модели окружающего мира.

Как форма отражения действительности моделирование зародилось в далеком прошлом нашей цивилизации. Наскальные изображения животного, раненого копьем охотника, можно рассматривать как модель удачной охоты, созданную древним художником. По мере того, как человечество познает окружающий мир, модели становятся более абстрактными, теряют внешнее сходство с реальными объектами. Примером применения моделирования в античную эпоху может служить описание Эпикуром и Демокритом атомов, их геометрии, способов взаимодействия, представления о физических свойствах разнообразных веществ, зависящих от круглой и гладкой или крючковатой формы частиц, связанных между собой. Эти модели послужили прообразами современных моделей, отображающих ядерно-электронное строение атома.

Данный метод познания широко использовался в эпоху Возрождения: Микеланджело, Филиппо Брунеллески, Леон Баттиста Альберти, Донато Браманте, Джорджо Вазари, и другие итальянские архитекторы и скульпторы использовали модели проектируемых ими сооружений; в теоретических работах Г. Галилея и Леонардо да Винчи не только используются модели, но и выясняются пределы применимости метода. В XIX-XX вв. трудно назвать область науки или её приложений, где моделирование не имело бы существенного значения. Исключительно большую методологическую роль сыграли в этом отношении работы Кельвина, Дж. Максвелла, Ф. А. Кекуле, А. М. Бут-

лерова и других физиков и химиков — именно эти науки стали, стартовой площадкой формирования и развития методов моделирования. В XX веке моделирование достигло определенных успехов, но также встретило определенные проблемы. С одной стороны, теория относительности, а также, квантовая механика, обнаружили неабсолютный, относительный характер механических моделей, сложности, связанные с моделированием. С другой стороны, прогрессирующий математический аппарат нашел новые перспективы этого способа в обнаружении общих законов и особенностей структуры систем разной физической природы, происходящих из разных уровней организации материи, форм движения.

Появление первых электронных вычислительных машин (Дж. Нейман, 1947) и формулирование основных принципов кибернетики (Н. Винер, 1948) привели к поистине универсальной значимости новых методов — как в абстрактных областях знания, так и в их приложениях.

Отметим, что искусство, как способ познания окружающего мира, фактически является процессом создания моделей. Например, такой литературный жанр, как басня, переносит реальные отношения между людьми на отношения между животными и фактически создает модели человеческих отношений. Более того, практически любое литературное произведение может рассматриваться как модель реальной человеческой жизни. Моделями, в художественной форме отражающими реальную действительность, являются также живописные полотна, скульптуры, театральные постановки и т. д.

Таким образом, моделирование в настоящее время приобрело общенаучный характер и применяется в исследованиях живой и неживой природы, в науках о человеке и обществе. Широкое распространение моделирования как метода научного познания в многочисленных исследованиях, возникающие при этом проблемы и противоречия, нуждались в глубоком теоретическом осмыслении этого метода познания, в осознании его значимости для теории познания.

1.2 Понятия «модель» и «моделирование»

Процесс моделирования включает три компонента:

- субъект (исследователь, экспериментатор),
- объект исследования,
- модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Материально или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал так, что его непосредственное изучение дает новые знания об объекте-оригинале, называется моделью. Иными словами, свойства и поведение объекта изучают путем применения вспомогательной системы — модели, находящейся в определенном соответствии с исследуемым объектом.

Модель не может заменить сам объект. Но при решении конкретной задачи, когда нас интересуют определенные свойства изучаемого объекта, модель оказывается полезным, а подчас и единственным инструментом исследования. Необходимость применения моделей для изучения окружающего мира может быть вызвана различными причинами. В реальном времени оригинал может не существовать (например, теория вымирания динозавров, теория гибели Атлантиды, модель «ядерной зимы» и др.). Оригинал может иметь много свойств и взаимосвязей и чтобы глубоко изучить какое-то конкретное свойство, иногда целесообразно отказаться от менее существенных (например, карта местности, модели живых организмов). Оригинал может иметь очень большие или очень малые размеры (например, глобус, модель Солнечной системы, модель атома). Модели удобно применять при изучении процессов, протекающих очень быстро или очень медленно (например, модель двигателя внутреннего сгорания, геологические модели), а также в случаях, когда исследование объекта может привести к его разрушению (например, модель самолета или автомобиля).

Таким образом, под моделью понимают:

- некоторое упрощенное подобие реального объекта;
- воспроизведение предмета в уменьшенном или увеличенном виде (макет);
- схема, изображение или описание какого-либо явления или процесса в природе и обществе;
- физический или информационный аналог объекта, функционирование которого по определённым параметрам подобно функционированию реального объекта;
- некий объект-заменитель, который в определённых условиях может заменять объект-оригинал, воспроизводя интересующие нас его свойства и характеристики, причем имеет существенные преимущества и удобства (наглядность, обозримость, доступность испытаний, лёгкость оперирования с ним и так далее);

- новый объект, который отражает некоторые стороны изучаемого объекта или явления, существенные с точки зрения целей моделирования;
- новый объект (реальный, информационный или воображаемый), отличный от исходного, который обладает существенными для целей моделирования свойствами и, в рамках этих целей, полностью заменяет исходный объект.

Любая модель характеризуется основными свойствами, к которым относятся:

1. *конечность* — модель отображает оригинал лишь в конечном числе его отношений и, кроме того, ресурсы моделирования конечны;
2. *упрощенность* — модель отображает только существенные стороны объекта и должна быть проста для исследования или воспроизведения;
3. *приблизительность* — действительность отображается моделью грубо или приблизительно;
4. *адекватность моделируемой системе* — модель должна успешно описывать моделируемую систему;
5. *наглядность, обозримость* основных свойств и отношений;
6. *доступность и технологичность* для исследования или воспроизведения;
7. *информативность* — модель должна содержать достаточную информацию о системе (в рамках гипотез, принятых при построении модели) и давать возможность получить новую информацию;
8. *сохранение информации*, содержащейся в оригинале (с точностью рассматриваемых при построении модели гипотез);
9. *полнота* — в модели должны быть учтены все основные связи и отношения, необходимые для обеспечения цели моделирования;
10. *устойчивость* — модель должна описывать и обеспечивать устойчивое поведение системы, если даже та вначале является неустойчивой;
11. *замкнутость* — модель учитывает и отображает замкнутую систему необходимых основных гипотез, связей и отношений.

1.3 Моделирование как метод научного познания

Под моделированием понимается процесс построения моделей реально существующих объектов (предметов, явлений, процессов), изучения и применения моделей. Моделирование является неотъемлемым элементом любой целенаправленной деятельности и представляет собой один из основных методов познания.

1.3.1 Цели моделирования

В процессе моделирования каждый его аспект раскрывается через совокупность свойств, т.е. характеризуется их набором: внешний вид — набором признаков, структура — перечнем элементов и указанием отношений между ними, поведение — изменением внешнего вида и структуры с течением времени.

Некоторые свойства объекта моделирования могут быть выражены величинами, принимающими числовые значения. Такие величины носят название параметров модели.

Цель моделирования возникает, когда субъект моделирования решает поставленную перед ним задачу, и зависит как от решаемой задачи, так и от субъекта моделирования. Таким образом, цель моделирования имеет двойственную природу: с одной стороны, она объективна, так как обуславливается задачей исследования, с другой — субъективна, поскольку исследователь всегда корректирует её в зависимости от опыта, интересов, мотивов деятельности.

Для одного объекта один субъект может построить несколько моделей, если он решает разные задачи, приводящие к разным целям моделирования. Для одного объекта разные субъекты могут построить разные модели, даже если задача моделирования у них одна. Выбор вида модели и её построение зависят от знаний, опыта, предпочтений, личных интересов субъекта. Разные объекты могут иметь одинаковые по виду модели, даже если их строили разные субъекты, исходя из разных целей моделирования.

Таким образом, никакая модель не может учесть все свойства и поведение прототипа, поэтому полученный на основе модели результат соответствует реальности приближённо. Степень приближения зависит от степени адекватности модели. Создавая модель, человек стремится отобразить наиболее существенные признаки объекта, пренебрегая теми, которые не оказывают заметного влияния на результат.

Можно выделить следующие цели моделирования:

1. Выяснение механизмов взаимодействия элементов системы. Важнейшим здесь является выявление функциональных соотношений — определение количественных зависимостей между входными факторами модели, и выходными характеристиками исследуемого объекта. Подобного рода модели по своему характеру являются описательными, задача выявления функциональных соотношений присутствует при построении математических моделей любых типов. Разновидностью данного типа исследования является задача измерения неявных свойств объекта (выделения латентных переменных), при решении которой (например, с помощью математического аппарата факторного анализа) выражают большое число исходных косвенных факторов через меньшее число более емких внутренних характеристик явления, не имеющих непосредственного количественного выражения.

2. Оценка устойчивости системы (модели). Само понятие устойчивости требует формализации. В большинстве случаев оценка устойчивости сводится к анализу чувствительности — установление из большого числа действующих факторов тех, которые в большей степени влияют на интересующие исследователя выходные характеристики. Модели анализа чувствительности должны обязательно предусматривать возможность варьирования интересующими исследователя характеристиками внешней среды, начальными условиями, переменными управления. Помимо основной математической модели — системы функциональных соотношений — они могут включать модели входов, обеспечивающие целенаправленную вариацию входных факторов, и модель выхода, проводящую обработку результатов вычислений и дающую итоговую информацию о степени чувствительности модели к тому или иному фактору. Модели анализа чувствительности могут быть использованы для оценки точности решений, получаемых по моделям любых типов.

3. Прогноз — оценка поведения объекта при некотором предполагаемом сочетании внешних условий. Обычно задачи прогноза являются динамическими относительно входов, и в качестве независимой (неуправляемой) переменной в них выступает время. Модели прогноза также являются описательными. Основная система функциональных соотношений в зависимости от специфики задачи может быть функцией времени (но может и не быть). Функцией времени, как правило, являются характеристики внешней среды, а также в ряде случаев параметры объекта. Для реализации моделей прогноза необходимо построение динамических моделей входов, отражающих характер изменения указанных факторов во времени.

4. Оценка — определение, насколько хорошо исследуемый объект будет соответствовать некоторым критериям. В отличие от рассмотренных выше типов моделей модели оценки включают расчеты интересующих исследователя интегральных характеристик — критериев, формализующих цели исследова-

дования. Модели оценки занимают промежуточное положение между описательными и оптимизационными моделями. В них заданы критерий и его некоторое «критическое» значение, но проводится не оптимизация, а лишь сравнение расчетного значения с «критическим», после чего принимается решение об удовлетворении характеристик объекта предъявленными требованиями. В практических расчетах точностные требования к моделям данного типа повышенные.

5. **Сравнение** — сопоставление ограниченного числа альтернативных вариантов систем или же сопоставление нескольких предлагаемых принципов или методов действия. Задача сравнения предусматривает оценку каждого варианта по одному или нескольким критериям и дальнейший выбор наилучшего. Число вариантов предполагается незначительным, в связи с чем оцениваются все варианты (прямой перебор). Хотя модели этого типа близки к оптимизационным, специальный блок оптимизации в них отсутствует.

6. **Оптимальное управление системой** в соответствии с выбранным критерием оптимальности. Оптимизация — точное определение такого сочетания переменных управления, при котором обеспечивается экстремальное (максимальное или минимальное в зависимости от смысла критерия оптимальности) значение целевой функции. Главное отличие от вышерассмотренного случая — наличие специального блока оптимизации, позволяющего целенаправленно и наиболее эффективно с вычислительной точки зрения просматривать множество альтернативных вариантов, число которых нередко близко к бесконечности.

1.3.2 Принципы и аксиомы моделирования

Моделирование базируется на нескольких основополагающих принципах:

- **Принцип информационной достаточности** — при полном отсутствии информации об объекте построение его модели невозможно. Существует некоторый уровень априорной информации об объекте, только при достижении которого может быть построена адекватная модель. При наличии полной информации об объекте построение его модели не имеет смысла.
- **Принцип осуществимости** — создаваемая модель должна обеспечивать достижение поставленной цели исследования с вероятностью, существенно отличающейся от нуля.
- **Принцип множественности моделей** — создаваемая модель должна отражать в первую очередь те свойства реального объекта (системы),

которые интересуют исследователя. Для полного исследования объекта необходимо достаточно большое количество моделей, отражающих исследуемый объект с разных сторон и с разной степенью детализации.

- **Принцип иерархии** — в большинстве исследований систему целесообразно представить как совокупность подсистем, для описания которых оказываются пригодными стандартные схемы.
- **Принцип параметризации** — модель строится в виде известной системы, параметры которой неизвестны.

Решение любой практической задачи всегда связано с исследованием, преобразованием некоторого объекта (материального или информационного) или управлением им. Модель выступает как своеобразный инструмент для познания, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает интересующий его объект.

Аксиомой в научной методологии принято считать исходное, принимаемое без доказательства положение. В моделировании можно выделить несколько аксиом.

Аксиома 1. Модель не существует сама по себе, а выступает в тандеме с некоторым материальным объектом, который она представляет (замечает) в процессе его изучения или проектирования.

Аксиома 2. Для естественных материальных объектов модель вторична, т. е. появляется как следствие изучения и описания этого объекта (например, модель солнечной системы). Для искусственных материальных объектов (создаваемых человеком или техникой) модель первична, так как предшествует появлению самого объекта (например, модель самолета, модель двигателя).

Аксиома 3. Модель всегда проще объекта. Она отражает только некоторые его свойства, а не представляет объект «во всем великолепии». Для одного объекта строится целый ряд моделей, отражающих его поведение или свойства с разных сторон или с разной степенью детальности. При бесконечном повышении качества модели она приближается к самому объекту.

Аксиома 4. Модель должна быть подобна тому объекту, который она замечает, т. е. модель в определенном смысле является копией, аналогом объекта. Если в исследуемых ситуациях модель ведет себя так же, как и

моделируемый объект, или это расхождение невелико и устраивает исследователя, то говорят, что модель адекватна оригиналу. Адекватность — это воспроизведение моделью с необходимой полнотой и точностью всех свойств объекта, существенных для целей данного исследования.

Аксиома 5. Построение модели не самоцель. Она строится для того, чтобы можно было экспериментировать не с самим объектом, а с более удобным для этих целей его представителем, называемым моделью.

1.3.3 Основные этапы построения моделей

При моделировании, выборе и формулировке модели, определяющими обстоятельствами являются объект, цель и метод (средства) моделирования.

Выделяют основные этапы построения моделей:

1. Постановка цели моделирования.
2. Анализ моделирования объекта и выделение всех его известных свойств.
3. Анализ его выделенных свойств с точки зрения цели моделирования и определение, какие из них следует считать существенными.
4. Выбор формы представления модели.
5. Формализация.
6. Анализ полученной модели на непротиворечивость.
7. Анализ адекватности полученной модели объекту и цели моделирования.

Моделирование — циклический процесс. Это означает, что за первым циклом может последовать второй, третий и т. д. При этом знания об исследуемом объекте расширяются и уточняются, а исходная модель постепенно совершенствуется. Недостатки, обнаруженные после первого цикла моделирования, обусловленные малым знанием объекта или ошибками в построении модели, можно исправить в последующих циклах.

Не существует универсальных правил определения, какие из известных свойств объекта являются существенными для конкретного случая.

Если условия моделирования позволяют, то рекомендуется выполнить построение нескольких моделей с разными наборами «существенных» свойств и затем оценить их на адекватность объекту и цели моделирования. Прежде чем использовать модель необходимо проверить, отвечает ли она определённым требованиям. К модели предъявляются следующие требования:

1. Она должна удовлетворять требованиям полноты, адаптивности, обеспечивать возможность достаточно широких изменений. Это нужно для последовательного приближения к моделям, удовлетворяющим требованиям точности воспроизведения объекта. Полнота модели должна рассматриваться с различных точек зрения. Функциональная полнота модели должна позволять реализовывать те функции, которые присущи объекту. Кроме того, модель должна быть достаточно полной для обеспечения рассмотрения достаточно большого числа вариантов и требуемой точности исследования.
2. Модель должна быть достаточно абстрактной, чтобы допускать варьирование большим числом переменных. Но в стремлении к абстрактности важно, чтобы не был утерян физический смысл и возможность оценки полученных результатов.
3. Модель должна удовлетворять требованиям и условиям, ограничивающим время решения задачи. При исследовании в реальном масштабе времени допустимое время решения определяется ритмом функционирования объекта при нештатных ситуациях. Для достижения опережения или синхронности с процессами внутри объекта решают задачу снижения затрат машинного времени.
4. Модель должна ориентироваться на реализацию с помощью существующих технических средств, т. е. должна быть физически осуществима на данном уровне развития техники с учетом ограничения конкретного предприятия, выполняющего прогнозирование.
5. Модель должна обеспечивать получение полезной информации об объекте в плане поставленной задачи исследования. В связи с тем что в большинстве случаев экономико-математические модели строятся с целью оптимизации моделируемых процессов, это требование можно понимать как требование оптимизации модели. Информация, полученная с помощью модели, должна обеспечить расчет значений и позволить определить шаги поиска ее экстремального значения. В качестве постоянных требований к исследовательским моделям могут выступать требования обеспечить заданные достоверность, точность результата при минимальных затратах на его разработку.
6. По возможности модель должна строиться с использованием общепринятой терминологии.

7. Модель должна предусматривать реальность проверки истинности соответствия ее оригиналу, т. е. обеспечивать проверку адекватности или верификацию.
8. Модель должна обладать свойством робастности — устойчивости по отношению к ошибкам в исходных данных. В противном случае может иметь место использование результатов исследования при относительно небольших изменениях исходных данных. Это требование особенно важно в условиях относительно низкой точности исходных данных.

Общие проблемы моделирования:

- недостоверные исходные допущения (неверно выбраны переменные или вид зависимости; неправильно спрогнозировано будущее влияние факторов на ситуацию);
- информационные ограничения (недостаток информации, необходимой для построения или применения модели);
- страх пользователей (недостаточная компетенция, особенности личности);
- слабое применение на практике;
- чрезмерная стоимость (большие затраты труда высококвалифицированных и высокооплачиваемых специалистов при построении и внедрении модели).

1.4 Классификация моделей

Прежде всего, следует отметить, что границы между моделями различных типов или же классификация моделей по тому или иному типу часто весьма расплывчаты. С этих позиций, более корректно говорить лишь о различных режимах использования моделей — имитационном, стохастическом и т. д.

Все основные типы моделей, возможно, за исключением некоторых натуральных — системно-информационные (инфосистемные) и информационно-логические (инфологические). В узком понимании информационная модель — это модель, описывающая, изучающая, актуализирующая информационные связи и отношения в исследуемой системе. В еще более узком понимании информационная модель — это модель, основанная на данных, структурах

данных, их информационно-логическом представлении и обработке. Как широкое, так и узкое понимание информационной модели необходимы, определяются решаемой проблемой и доступными для ее решения ресурсами, в первую очередь информационно-логическими.

По характеристике объекта моделирования все модели можно подразделить на:

- модель внешнего вида — ярким примером модели внешнего вида является манекен человека, который отражает внешний вид фигуры человека;
- модель структуры — примером модели структуры может служить скелет человека который отражает его внутреннее строение;
- модель поведения — поведение езды на велосипеде моделирует велотренажер.

По сферам деятельности субъекта моделирования:

- познавательные - знания пианиста о музыкальной грамоте могут моделировать ноты, записанные на бумаге;
- коммуникативные;
- возникающие в сфере практической деятельности — сборочный чертёж как модель, возникающая в сфере практической деятельности, предназначена для преобразования сырья и материалов в изделие.

По уровню моделирования модели подразделяются на:

- эмпирические — на основе эмпирических фактов, зависимостей;
- теоретические — на основе математических описаний;
- смешанные или полуэмпирические — использующие эмпирические зависимости и математические описания.

По сущности:

- вещественно-энергетические (натурные) модели — в этом случае, модель и моделируемый объект представляют собой реальные объекты или процессы единой или различной физической природы, причём между процессами в объекте-оригинале и в модели выполняются некоторые соотношения подобия, вытекающие из схожести физических явлений. Самый простой пример натурной модели — это картина с изображением природы. Она моделирует пейзаж, с которого был срисован;

- идеальные (воображаемые) - в физике какую-либо планету принимают за материальную точку, эта точка — воображаемая (идеальная) модель этой планеты;
- информационные — это описание объекта на каком-либо языке.

Абстрактность модели проявляется в том, что её компонентами являются сигналы и знаки (вернее, заложенный в них смысл), а не физические тела. Примером может служить Периодическая система элементов Д.И. Менделеева — информационная модель, отражающая структуру вещества. Информационные модели могут быть дискриптивными (от англ. descriptive — описательная), смешанными или наглядными. Дискриптивная модель — это словесное описание объекта, выраженное средствами того или иного языка. Она может быть исполнена на естественном языке (словесное описание) или специальном языке (научные — математические формулы, алгоритмы и технические модели — техкарты, программы). К смешанным относят таблицы, графы (деревья, сети, блок-схемы), схемы, карты, видеофильмы. К наглядным, то есть выраженным на языке представления, — рисунки, чертежи, графики, фотографии.

По роли управления объектом моделирования выделяют:

- регистрирующие, например регистрирующей моделью любого продукта, продающего в магазине является его штрих — код, с помощью него этот продукт заносится в базу данных компьютера и распознаётся им;
- эталонные, например, эталонной моделью веса является 1 килограмм;
- прогностические, например график, на котором будет показано изменение температуры с течением времени на будущее;
- имитационные, например человеческий силуэт, можно сказать, является имитацией настоящей фигуры, таким образом, силуэт — имитационная модель человека;
- оптимизационные.

В процессе познания и общения мы сталкиваемся с формализацией практически на каждом шагу: формулируем мысли, оформляем отчёты, заполняем всевозможные формуляры, преобразуем формулы. В общем виде формализация понимается как сведение некоторого содержания (содержания текста, смысла научной теории, воспринимаемых сигналов и так далее) к выбранной форме. Оглавление книги — это формализация её содержательных

частей, а сам текст книги можно рассматривать как формализацию посредством языковых конструкций мыслей, идей, размышлений автора. Итогом формализации научной теории является, как правило, совокупность формул, графиков, схем, таблиц и так далее. План действий в результате формализации переводится в алгоритм.

По степени формализации модели классифицируются на следующие виды:

- Неформализованные — описание внешности героя литературного произведения — неформализованная модель внешности этого героя;
- частично формализованные — кулинарный рецепт является частично формализованной моделью, предназначенной для практической деятельности повара;
- формализованные — программа ЭВМ.

По учету фактора времени:

- статические модели отображают объект в какой-то момент времени без учёта происходящих с ним изменений, как находящийся в состоянии покоя и равновесия. В этих моделях отсутствует временной параметр. Старая детская фотография является статической моделью образа.
- динамические модели описывают поведение объекта во времени. Эти модели отображают процессы, происходящие с объектом во времени. В частности, таковыми являются модели функционирования и развития. График ожидаемого изменения температуры воздуха — динамическая модель, так как температура меняется с течением времени.

Среди динамических выделяют модели детерминированные и стохастические. Детерминированные модели отображают процессы, в которых отсутствуют случайные воздействия. Детерминированной динамической моделью является график движения автомобиля с постоянным ускорением, так как скорость его меняется по определённому закону и легко прогнозируема. Стохастические (вероятностные) модели — описания объектов, поведение которых определяется случайными воздействиями (внешними и внутренними); описания вероятностных процессов и событий, характер изменения которых во времени точно предсказать невозможно. Стохастической динамической моделью является график движения молекул, так как они движутся беспорядочно ни по какому закону.

При чтении литературы по моделированию можно встретить следующие определения видов моделей.

Имитационная компьютерная модель — отдельная программа, совокупность программ, программный комплекс, позволяющий с помощью последовательности вычислений и графического отображения их результатов воспроизводить (имитировать) процессы функционирования объекта, системы объектов при условии воздействия на объект различных, как правило случайных, факторов.

Имитационная алгоритмическая модель — содержательное описание объекта в форме алгоритма, отражающее структуру и процессы функционирования объекта во времени, учитывающее воздействие случайных факторов.

Гносеологические модели направлены на изучение объективных законов природы (модели солнечной системы, развития биосферы, шаровой молнии).

Сенсуальные модели (лат. *sensualis* — основанный на чувствах, ощущениях) — модели каких-то чувств, эмоций, либо модели, оказывающие воздействие на чувства человека (музыка, поэзия, живопись).

Аналоговая модель — аналог объекта, который ведёт себя как реальный объект, но не выглядит как таковой.

Характеристика некоторых видов моделирования представлена в табл. 1.

1.5 Математические модели

Математическое моделирование сегодня является наиболее распространенным и универсальным концептуальным методом описания и изучения объектов. Объясняется это прежде всего тем, что общее развитие современной науки, характеризующееся изучением сложных явлений и систем, в основе которых лежат процессы различной физической природы, переносит акценты исследования из области конкретных прикладных дисциплин в междисциплинарную область. При этом математическое моделирование выступает как общий, единый универсальный инструмент описания этих явлений.

Математическая модель представляет собой совокупность математических объектов (чисел, символов, множеств, векторов и т.п.) и связей между ними, отражающих важнейшие для исследователя свойства изучаемого объекта. Можно определить математическую модель следующим образом:

- совокупность записанных на языке математики соотношений (формул, неравенств, уравнений, логических соотношений), определяющих характеристики состояния объекта в зависимости от его элементов, свойств, параметров, внешних воздействий;

- приближённое описание объекта, выраженное с помощью математической символики.

Математическое моделирование может быть реализовано в форме аналитического или имитационного (может быть и их комбинация). Сегодня именно имитационное моделирование является мощным и эффективным средством исследования технических и других систем.

1.5.1 Задачи математического моделирования

1. Прямая задача: все параметры исследуемой системы известны и изучается поведение модели в различных условиях.

2. Обратные задачи:

- Задача распознавания: определение параметров модели путем сопоставления наблюдаемых данных и результатов моделирования. По результатам наблюдений пытаются выяснить, какие процессы управляют поведением объекта, и находят определяющие параметры модели. В обратной задаче распознавания требуется определить значения параметров модели по известному поведению системы как целого. Примеры задач распознавания: задача электроразведки (определение подземных структур при помощи измерений на поверхности), задача магнитной дефектоскопии (определение дефекта в детали, помещенной между полюсами магнита, по возмущению магнитного поля на поверхности детали).
- Задача синтеза (задача математического проектирования): построение математических моделей систем и устройств, которые должны обладать заданными техническими характеристиками. В отличие от задач распознавания, заключающихся в определении параметров модели, соответствующей реальному состоянию системы, в задачах синтеза отсутствует требование единственности решения. Отсутствие единственности решения позволяет из нескольких возможных решений выбрать технически наиболее приемлемый результат. Примеры задач синтеза: синтез диаграммы направленности антенны (определение распределения токов, создающих заданную диаграмму направленности антенны), синтез градиентных световодов (определение профиля функции диэлектрической проницаемости, при котором световод обладает заданными характеристиками).

3. Задача проектирования управляющих систем: особая область математического моделирования, связанная с автоматизированными информационными системами и автоматизированными системами управления.

1.5.2 Основные этапы метода математического моделирования

1 этап — создание качественной модели. Выясняется характер законов и связей, действующих в системе. В зависимости от природы модели эти законы могут быть физическими, химическими, биологическими, экономическими. Задача моделирования — выявить главные, характерные черты явления или процесса, его определяющие особенности. Применительно к исследованию физических явлений создание качественной модели — формулировка физических закономерностей явления или процесса на основании эксперимента.

2 этап — создание математической модели, то есть постановка математической задачи. Если математическая модель описывается некоторыми уравнениями, то такая модель называется детерминированной. Если модель описывается некоторыми вероятностными законами, то такая модель называется стохастической. Для создания математической модели необходимо выделить существенные факторы и дополнительные условия (начальные, граничные, условий сопряжения и т.д.). Основной принцип: если в системе действует несколько факторов одного порядка значимости, то все они должны быть учтены, или все отброшены.

3 этап — изучение математической модели:

- Математическое обоснование модели. Исследование внутренней непротиворечивости модели. Обоснование корректности дифференциальной модели. Доказательство теорем существования, единственности и устойчивости решения.
- Качественное исследование модели. Выяснение поведения модели в крайних и предельных ситуациях.
- Численное исследование модели, в ходе которого необходима разработка алгоритма и разработка численных методов исследования модели. Разрабатываемые методы должны быть достаточно общими (пригодными для исследования математических моделей достаточно широкого класса) и алгоритмичными (обеспечивающими автоматизацию вычислений), позволять распараллеливание (использование кластерных вычислительных систем). После разработки методов исследования приступают к созданию и реализации программы.

4 этап — получение результатов и их интерпретация. Сопоставление полученных данных с результатами качественного анализа, натурального эксперимента и данными, полученными с помощью других численных алгоритмов. Уточнение и модификация модели и методов ее исследования.

5 этап — использование полученных результатов, предсказание новых явлений и закономерностей.

1.5.3 Принципы и подходы к построению математических моделей

Математическое моделирование многие считают скорее искусством, чем стройной и законченной теорией. Здесь очень велика роль опыта, интуиции и других интеллектуальных качеств человека. Поэтому невозможно написать достаточно формализованную инструкцию, определяющую, как должна строиться модель той или иной системы. Тем не менее, отсутствие точных правил не мешает опытным специалистам строить удачные модели. К настоящему времени уже накоплен значительный опыт, дающий основание сформулировать некоторые принципы и подходы к построению моделей. При рассмотрении порознь каждый из них может показаться довольно очевидным. Но совокупность взятых вместе принципов и подходов далеко не тривиальна. Многие ошибки и неудачи в практике моделирования являются прямым следствием нарушения этой методологии.

Принципы определяют общие требования, которым должна удовлетворять правильно построенная модель. Рассмотрим эти принципы.

1. **Адекватность.** Этот принцип предусматривает соответствие модели целям исследования по уровню сложности и организации, а также соответствие реальной системе относительно выбранного множества свойств. До тех пор, пока не решен вопрос правильно ли отображает модель исследуемую систему, ценность модели незначительна.
2. **Соответствие модели решаемой задаче.** Модель должна строиться для решения определенного класса задач или конкретной задачи исследования системы. Попытки создания универсальной модели, нацеленной на решение большого числа разнообразных задач, приводят к такому усложнению, что она оказывается практически непригодной. Опыт показывает, что при решении каждой конкретной задачи нужно иметь свою модель, отражающую те аспекты системы, которые являются наиболее важными в данной задаче. Этот принцип связан с принципом адекватности.

3. **Упрощение при сохранении всех существенных свойств системы.** Модель должна быть в некоторых отношениях проще прототипа — в этом смысл моделирования. Чем сложнее рассматриваемая система, тем по возможности более упрощенным должно быть ее описание, умышленно утрирующее типичные и игнорирующее менее существенные свойства. Этот принцип может быть назван принципом абстрагирования от второстепенных деталей.

4. **Соответствие между требуемой точностью результатов моделирования и сложностью модели.** Модели по своей природе всегда носят приближенный характер. Возникает вопрос, каким должно быть это приближение. С одной стороны, чтобы отразить все сколько-нибудь существенные свойства, модель необходимо детализировать. С другой стороны, строить модель, приближающуюся по сложности к реальной системе, очевидно, не имеет смысла. Она не должна быть настолько сложной, чтобы нахождение решения оказалось слишком затруднительным. Компромисс между этими двумя требованиями достигается нередко путем проб и ошибок. Практическими рекомендациями по уменьшению сложности моделей являются:

- изменение числа переменных, достигаемое либо исключением несущественных переменных, либо их объединением. Процесс преобразования модели в модель с меньшим числом переменных и ограничений называют агрегированием. Например, все типы ЭВМ в модели гетерогенных сетей можно объединить в четыре типа — ПЭВМ, рабочие станции, большие ЭВМ (мейнфреймы), кластерные ЭВМ;
- изменение природы переменных параметров. Переменные параметры рассматриваются в качестве постоянных, дискретные — в качестве непрерывных и т.д. Так, условия распространения радиоволн в модели радиоканала для простоты можно принять постоянными;
- изменение функциональной зависимости между переменными. Нелинейная зависимость заменяется обычно линейной, дискретная функция распределения вероятностей — непрерывной;
- изменение ограничений (добавление, исключение или модификация). При снятии ограничений получается оптимистичное решение, при введении — пессимистичное. Варьируя ограничениями можно найти возможные граничные значения эффективности. Такой прием часто используется для нахождения предварительных оценок эффективности решений на этапе постановки задач;

- ограничение точности модели. Точность результатов модели не может быть выше точности исходных данных.

5. **Баланс погрешностей различных видов.** В соответствии с принципом баланса необходимо добиваться, например, баланса систематической погрешности моделирования за счет отклонения модели от оригинала и погрешности исходных данных, точности отдельных элементов модели, систематической погрешности моделирования и случайной погрешности при интерпретации и осреднении результатов.
6. **Многовариантность реализаций элементов модели.** Разнообразие реализаций одного и того же элемента, отличающихся по точности (а следовательно, и по сложности), обеспечивает регулирование соотношения «точность/сложность».
7. **Блочное строение.** При соблюдении принципа блочного строения облегчается разработка сложных моделей и появляется возможность использования накопленного опыта и готовых блоков с минимальными связями между ними. Выделение блоков производится с учетом разделения модели по этапам и режимам функционирования системы. К примеру, при построении модели Для системы радиоразведки можно выделить модель работы излучателей, модель обнаружения излучателей, модель пеленгования и т.д.

1.6 Моделирование в биологии

1.6.1 Специфика моделей живых систем

Несмотря на разнообразие живых систем, все они обладают следующими специфическими чертами, которые необходимо учитывать при построении моделей.

1. **Сложность системы.** Все биологические системы являются сложными многокомпонентными, пространственно структурированными, элементы которых обладают индивидуальностью. При моделировании таких систем возможно два подхода. Первый — агрегированный, феноменологический. В соответствии с этим подходом выделяются определяющие характеристики системы (например, общая численность видов) и рассматриваются качественные свойства поведения этих величин во времени (устойчивость стационарного состояния, наличие колебаний,

существование пространственной неоднородности). Такой подход является исторически наиболее древним и свойственен динамической теории популяций.

Другой подход — подробное рассмотрение элементов системы и их взаимодействий, рассмотренное выше имитационное моделирование. Имитационная модель не допускает аналитического исследования, но ее параметры имеют ясный физический и биологический смысл, при хорошей экспериментальной изученности фрагментов системы она может дать количественный прогноз ее поведения при различных внешних воздействиях.

2. **Способность к авторепродукции.** Это важнейшее свойство живых систем определяет их способность перерабатывать неорганическое и органическое вещество для биосинтеза биологических макромолекул, клеток, организмов. В феноменологических моделях это свойство выражается в наличии в уравнениях автокаталитических членов, определяющих возможность роста (в нелимитированных условиях — экспоненциального), возможность неустойчивости стационарного состояния в локальных системах (необходимое условие возникновения колебательных и квазистохастических режимов) и неустойчивости гомогенного стационарного состояния в пространственно распределенных системах (условие неоднородных в пространстве распределений и автоволновых режимов).

Важную роль в развитии сложных пространственно-временных режимов играют процессы взаимодействия компонентов (биохимические реакции) и процессы переноса, как хаотического (диффузия), так и связанного с направлением внешних сил (гравитация, электромагнитные поля) или с адаптивными функциями живых организмов (например, движение цитоплазмы в клетках под действием микрофиламентов).

3. **Открытые системы,** постоянно пропускающие через себя потоки вещества и энергии. Биологические системы далеки от термодинамического равновесия, и потому описываются нелинейными уравнениями. Линейные соотношения Онзагера, связывающие силы и потоки, справедливы только вблизи термодинамического равновесия.
4. **Иерархичность систем регуляции.** Биологические объекты имеют сложную многоуровневую систему регуляции. В биохимической кинетике это выражается в наличии в схемах петель обратной связи, как положительной, так и отрицательной. В уравнениях локальных вза-

имодействий обратные связи описываются нелинейными функциями, характер которых определяет возможность возникновения и свойства сложных кинетических режимов, в том числе колебательных и квазистохастических.

Такие нелинейности при учете пространственного распределения и процессов переноса обуславливают паттерны стационарных структур (пятна различной формы, периодические диссипативные структуры) и различные типы автоволнового поведения (движущиеся фронты, бегущие волны, ведущие центры, спиральные волны и др.)

На уровне органа, организма, популяции живая система также является гетерогенной, и это ее основополагающее свойство необходимо учитывать при создании математической модели. Само возникновение пространственной структуры и законы ее формирования представляет одну из задач теоретической биологии. Один из подходов решения такой задачи — математическая теория морфогенеза.

К. Боулдинг с целью выделения уровней изучения любой системы классифицирует последние по уровням сложности, каждый из которых привносит новые системные свойства, неразличимые на предыдущих уровнях:

- простая структура (элементный состав и межэлементные связи);
- простой механизм (функционирование);
- динамическая система - замкнутая, открытая (изменение во времени, взаимодействие со средой);
- управляемая система (целенаправленность);
- кибернетическая система (множественность целей, самоуправление);
- живая система (гомеостазис, самоорганизация, эволюция);
- организм (взаимодействие самоуправляемых подсистем);
- животное (подсознание, поведение);
- человек (сознание);
- организация (коллективный труд);
- социум (создание искусственных систем - социальных институтов, науки, культуры, религии и т.п.).

1.6.2 Использование моделей в биологии

Мысленная модель, на каком бы языке она ни была выражена, в отличие от простого описания, помогает пониманию внутренней сути и, обусловленности явления. Однако прототип — особенно биологический, — как правило, сложен и нуждается в преднамеренном упрощении, схематизации. Если при этом известны свойства основных блоков или элементов изучаемой системы, то задача моделирования состоит в отыскании математической формулы, основанной на имеющихся сведениях о блоках и выражающей взаимосвязь блоков в системе.

Во многих случаях оказывается, что даже после упомянутых упрощений найти математический закон действия системы или конкретное решение уравнений, описывающих, по предположению, ту или иную зависимость, слишком трудно. Если, однако, среди физических объектов другой природы удастся подыскать такие, свойства которых могут быть по отдельности подогнаны к свойствам блоков, изучаемой биологической системы, то целесообразно построить из таких объектов и в согласии с гипотезой о всей системе вещественную модель или аналог (электрический, гидравлический и т. д.).

С таким аналогом можно далее экспериментировать, выверяя этим путем задуманную мысленную модель, определяя наиболее надежные значения параметров для уравнения, принципиальная форма которого уже установлена, и т. д. Метод аналогов особенно ценен для задачи подбора параметров в тех случаях, когда изучаемые системы нелинейны (что в биологии встречается очень часто), и потому аналитическое решение характеризующих их уравнений встречает слишком большие трудности.

Следует упомянуть об одном преимуществе метода аналогов (правда, пользоваться этим преимуществом следует с известной осторожностью) — на возможности изучать поведение аналога, уже выверенного при имитации процесса в его естественных границах, также и за их пределами. Это касается и рассмотрения в качестве аналогов (хотя они и называются моделями) культуры ткани, в частности мышечной, *in vitro*.

Наконец, еще одна ценная сторона моделирования (независимо от того, воплощены ли модели в физических аналогах или нет) состоит, по мнению большинства авторов, в том, что оно играет наводящую роль, подсказывая новые эксперименты как проверочного, так и поискового характера. Экспериментируя с аналогом или анализируя решения уравнений теоретической модели в разных условиях (здесь очень ценным является использование цифровых счетно-аналитических машин), исследователь постепенно выясняет для себя, какие расхождения между моделью и реальным объектом следует приписать влиянию «шумов», случайных помех или ошибок и какие несомненно долж-

ны закономерно обуславливаются новыми переменными или связями, ранее не принимавшимися в расчет. Такие заключения приводят к уточнению и обогащению модели и в то же время вдохновляют исследователя на новые формы и направления экспериментирования.

Попутно нельзя не отметить еще одной очень ценной стороны эвристического моделирования. Покуда знания автора относительно того или другого явления не выходят за пределы качественного описания, он зачастую не умеет количественно проверить, будет ли придуманная им качественная модель или гипотеза явления функционировать так же, как отображаемый ими прототип (или не утруждает себя такой проверкой).

История психофизиологии знает целый ряд примеров ляпсусов подобного происхождения — в особенности в области физиологии органов чувств. Когда Гельмгольц сформулировал свою резонансную теорию слуха, то, описав качественно, как должны вести себя по этой теории волокна-струны кортиева органа, он оставил совершенно в стороне элементарный вопрос о том, какой вообще может быть резонансная характеристика системы этого органа при данных значениях масс (ничтожных), упругости (весьма малой) и вязкости эндолимфы (очень большой).

Если бы Гельмгольц вовремя исправил этот промах (непростительный для такого титана физики), то при первом же строгом расчете он обнаружил бы, что при данных фактических параметрах резонанс в колебательной системе либо был бы вообще невозможен в силу сверхзатухания колебаний, либо выразился бы в виде совершенно уплощенной резонансной кривой, непригодной для какого бы то ни было распознавания тонов по высоте. Совершенно аналогичными ошибками изобилуют качественно-описательные модели зрительного различения фигур, предлагавшиеся теми учеными, которые пытались объяснить все разнообразие физиологических процессов с позиций учения о высшей нервной деятельности.

Во всех подобных случаях математически безукоризненная концептуальная модель, а еще более наглядно — вещественный аналог сразу изобличат недодуманную до конца концепцию. В мышлении человека всегда существует известный неосознаваемый произвол, при наличии которого горячая внутренняя убежденность автора способна побудить его принять, желаемое за действительное. Но уж модель, оформленная как программа для цифровой машины или как электронный аналог, не поддастся никаким попыткам уговорить или переубедить ее в чем-либо таком, что несогласно с ее структурой.

Модель неукоснительно работает по объективным законам природы или столь же прочно установленным законам математических отношений и поэтому служит требовательным и непреодолимым критерием того, может ли данная предполагаемая концепция правильно отобразить прототип или нет.

Изучение моделей в естественных науках и, в частности, в биологии имеет следующие направления. Одну из групп работ, образующих довольно компактное целое, составляют статьи, посвященные основным вопросам методики и методологии моделирования. В этих статьях сосредоточены материалы по общей математической теории моделирования. Вторую группу образуют статьи, рассматривающие вопросы о прикладном использовании математических моделей. Многие работы не отклоняются от общего теоретического профиля и прикладными могут быть названы не в смысле практического использования, а лишь в смысле содержащихся в них методических указаний по приложению общей теории к отдельным конкретным научным дисциплинам. Третью группу образуют исследования, приближающиеся по содержанию к пограничной или переходной области между моделированием и изучением изолированных тканей организма *in vitro*, где ткань, изъятая из организма и помещенная в искусственные, удобно варьируемые условия, начинает в известном смысле служить своей собственной вещественной моделью. Наконец, в последнюю, наименее однородную группу следует включить работы, объектами которых являются различные аспекты системного поведения высокоорганизованных систем. Здесь часто проводятся параллели между функциями нейронных сетей и вычислительных устройств.

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме регуляции процессов, происходящих в биосистемах. Всё разнообразие методов и подходов к математическому моделированию процессов регуляции в доступной литературе можно разбить на следующие группы.

1. Теория устойчивости и бифуркаций дифференциальных уравнений. Теория катастроф. Триггерные схемы перекрестной регуляции. В рамках методов этой группы разработчик модели остается в поле «классического» моделирования. Следовательно, составляющими соответствующих моделей служат физически интерпретируемые характеристики в качестве динамических переменных и перенос вещества и энергии в качестве потоковых слагаемых. Понятия управления в явном виде не вводятся. Математической формализацией построенных моделей являются системы нелинейных дифференциальных или разностных уравнений (как правило, заранее известного вида). Основной проблемой при применении данного подхода является то, что даже самые простые и известные системы, приводящие к требуемому поведению решения, все же сравнительно сложны, а для их использования в моделях прикладной направленности, как правило, не удается найти внятных аналогий с понятиями предметной области (регуляционные процессы и характеристики растительного организма). Единственным, пожалуй, исключением является предложенная Жакобом и Моно довольно простая и однозначно интерпретируемая в биологических терминах схема пе-

рекрётной регуляции. Простота и интерпретируемость, с одной стороны, и нетривиальность поведения решения — с другой, обусловили широкую применимость этой схемы в математическом моделировании биофизических процессов. Одним из наиболее интересных приложений триггерной схемы перекрестной регуляции Моно-Жакоба в применении к растению является модель Торнли, описывающая инициацию цветения.

2. Термодинамический подход. Вероятностные критерии дифференцировки. Теория нестационарных систем и диссипативных структур. Взаимодействие и порождение хаоса и порядка. Работы данного направления восходят в основном к трудам бельгийской школы, возглавляемой И.Р. Пригожиным. Основной направленностью этих работ является построение общей теории открытых систем и применение общих термодинамических подходов для описания законов их эволюции в нестационарном состоянии (со свободным притоком энергии извне и ее диссипацией внутри системы). Показано, что подобные системы способны демонстрировать крайне сложное и нетривиальное поведение, которое варьирует от полного хаоса до потрясающих свойств самоорганизации и вытекает из достаточно простых законов своего функционирования.

3. Теория автоматов. Механические и графические игровые аналоги. Клеточные автоматы. Грамматика Линдмайера. Попытки применения подобных чисто математических подходов — от клеточных автоматов до символических грамматик — к математическому моделированию роста и развития живой системы довольно многочисленны. Появившиеся в 70-80-е гг. XX в. разнообразные новые принципиальные подходы к моделированию развития были, однако, чисто абстрактными и формальными. Они не имели никакой видимой связи с реальными биологическими объектами и зачастую носили спекулятивный характер.

4. Формальная символическая логика. Теория параллельных алгоритмов. Исторически данное направление служит развитием подходов, указанных в предыдущем пункте. В качестве примера можно привести работы по формулировке основных принципов логического анализа онтогенеза. Используя понятия, теоремы и методы теории параллельных вычислений, объясняется известное из эксперимента критическое число клеток конуса нарастания, достижение которого инициализирует специализацию определенной части из них с образованием очередного структурного элемента.

5. Применение принципов оптимальности в биологии. Большинство философов и ученых-естественников склоняются к точке зрения, что побудительной силой функционирования живых существ является стремление к воспроизводству себе подобных. Таким образом, цель существования живого может быть определена как максимизация количественных и качественных

характеристик потомства. Данное утверждение пытаются сформулировать на формальном математическом языке в виде количественных соотношений — функционала цели. При этом естественным математическим аппаратом являются методы и алгоритмы математической теории оптимального управления. В основе этого метода лежат следующие постулаты:

- Организм рассматривается как сложная открытая динамическая система (развивающийся и циклически воспроизводящийся механизм) с определенной целью своего функционирования.
- Цель формулируется в интерпретируемых терминах воспроизводства наиболее многочисленного и жизнеспособного потомства.
- Законы метаболизма (производства и транспорта структурных веществ внутри растения) известны и неизменны. Они, в определенном смысле, представляют собой ограничения, формирующие допустимый набор траекторий развития.
- Конкретный исследуемый процесс регуляции интерпретируется как программа управления метаболизмом. Он представляет собой набор директив по внешним условиям и динамических обратных связей по внутренним переменным.
- Целью регуляции (управления) является достижение оптимального показателя поставленной цели, т.е. она служит решением некоторой обобщенной задачи оптимизации.

Попытки привлечения принципа оптимальности к описанию регуляторных функций организма предпринимаются в математической биологии уже довольно давно. Долгое время они носили отвлеченный и неконкретный характер. Практические же результаты в теории моделирования агроэкосистем ограничивались формулировкой локальных и глобальных критериев оптимальности. В последнее время появился ряд работ, где в рамках этого направления получены весьма интересные и нетривиальные результаты.

Абсолютно объективного критерия для оценки истинности того или иного подхода не существует в принципе хотя бы потому, что реальные физические, химические и другие механизмы моделируемой регуляции практически неизвестны. И единственным критерием сравнения разных подходов может служить то, насколько хорошо в рамках изучаемого алгоритма описываются видимые проявления реальных регуляторных механизмов, наблюдаемые в различных экспериментах. Подобный критерий оценки гипотез носит в научном жаргоне название «бритвы Оккама».

Глава 2

Системный подход в моделировании

2.1 Возникновение и развитие системных представлений

Концепция «общей теории систем» впервые была предложена Л. Фон Берта-ланфи еще до появления кибернетики, системотехники и связанных с ними дисциплин. Конечно, как и любое другое научное понятие, понятие системы имеет свою долгую историю. Хотя сам термин «система» далеко не всегда явно выделялся, эта история богата именами многих философов и ученых. В этой связи необходимо упомянуть «натуральную философию» Лейбница, Николая Кузанского с его совпадением противоположностей, мистическую медицину Парацельса, предложенную Вико и Ибн-Халдуном версию истории последовательности культурных сущностей, или «систем», диалектику Маркса и Гегеля, — этот перечень, конечно, далеко не полон.

В. Кёлер, выдвинувший проблему «физических гештальтов», проблему систем ограничил рассмотрением гештальтов в физике (и возможностью интерпретировать на этой основе биологические и психологические явления). В своих более поздних публикациях Кёлер выдвинул тезис о теории систем, предполагающий изучение общих свойств неорганических систем в сравнении с органическими; до некоторой степени это требование было выполнено в теории открытых систем. А. Лотка ближе всего подошел к этой цели, и основными формулировками на этот счет мы обязаны ему. Он рассматривал общее понятие системы, но его более интересовали проблемы популяции, чем биологические проблемы отдельного организма. Этим можно объяснить некоторые непоследовательности в концепции Лотки: он, например, рассматривал сообщества как системы и в то же время считал отдельный организм

суммой клеток.

Крестным отцом системного подхода является австрийский биолог Людвиг фон Берталанфи. Он выдвигает в 1932 году теорию открытых систем, базирующуюся на термодинамике необратимых процессов, из которой были почерпнуты теоретическая основа и формальный аппарат. Теория открытых систем, возникшая в приграничной области между физикой, физической химией и биологией, трактовала организм как систему, поддерживающуюся в состоянии «подвижного равновесия» за счет непрерывного обмена с окружающей средой веществом и энергией. Однако в ней содержался существенный недостаток, модель открытой термодинамической системы применима только к явлениям с неструктурным динамическим взаимодействием. И в 1937-38 годах в лекциях, прочитанных в Чикагском университете, Берталанфи впервые публично представляет свою общую теорию систем.

Берталанфи с самого начала понимал общую теорию систем как выражение существенных изменений в понятийной картине мира, которые принес с собой XX век. Организованная простота, описываемая ньютоновской механикой, плюс сложность термодинамической системы дают в сумме организованную сложность — систему. Задачей общей теории систем Берталанфи провозгласил: 1) формирование общих принципов и законов систем независимо от их вида; 2) путем анализа биологических, социальных, бихевиоральных объектов как систем особого типа установление точных и строгих законов в нефизических областях знания. Берталанфи организовал в 1954 году Общество исследований в области общей теории систем (Society for General System Research), куда кроме него вошли экономист К. Боулдинг, биоматематик А. Рапопорт, физиолог Ральф Жерар и другие ученые, представляющие различные отрасли науки.

С момента своего возникновения теория систем сразу же натолкнулась на критику, которая видела в ней фантастическую и весьма самонадеянную концепцию. Некоторые утверждали, что общая теория систем тривиальна, поскольку математику можно применять к любым вещам, и поэтому теория систем имеет значение, не большее, чем «открытие», что $2 + 2 = 4$ одинаково справедливо и для яблок, и для долларов, и для галактик. Другие считали ее ошибочной из-за поверхностных аналогий вроде известного сравнения общества с «организмом», которое скрывает действительные различия и в силу этого приводит к неверным и даже морально нежелательным выводам. Такие возражения упускали то, для чего была выдвинута теория систем, а именно задачу построения научного объяснения и теоретического знания в тех областях науки, где прежде их не было, и достижения более высокой степени обобщения, чем это позволяют сделать специальные науки.

Один из основателей статистической термодинамики и квантовой меха-

ники Эрвин Шредингер независимо от Бергаланфи и его теории открытых систем, бывших в то время совершенно неизвестными, в 1947 году выдвинул очень близкие им идеи. Отвечая на вопрос о том, что же получает живой организм с необходимыми ему для поддержания жизни едой, питьем, дыханием, Шредингер последовательно отвергает идею обмена материей или энергией. Действительно, всякий атом, скажем, азота, поступающий в наш организм с пищей, ничем не отличается от атома азота, извлекаемого из него. Нельзя понять, чему может помочь их простой обмен. Точно так же любая потребляемая калория абсолютно идентична калории, выделяемой в процессе жизнедеятельности. Во взрослом организме содержание энергии так же постоянно, как содержание вещества. В соответствии со вторым законом термодинамики каждый процесс, явление, событие, короче говоря, все, что происходит в природе, означает увеличение энтропии в той части мира, где это происходит. Живой организм также непрерывно увеличивает свою энтропию, стремясь к её максимуму — смерти. Он может сохранять равновесие, только извлекая из окружающей среды отрицательную энтропию (или отдавая ей положительную). Организм питается отрицательной энтропией. В самом деле, еда представляет собой наиболее сложно организованную материю — органическую, а вещества, выделяемые организмом, имеют существенно деградировавшую, по сравнению с первоначальным состоянием, форму.

Еще одним обстоятельством, вызвавшим разработку принципиально новых теорий и методологических средств исследования, явилось развитие техники. Вторая мировая война спровоцировала технологический скачок: развитие ракетной техники, управление термоядерной реакцией, создание автоматических систем управления и вычислительной техники, все это в получило бурное развитие и потребовало решать управленческие задачи. В 1944 году появилась теория игр Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна, в 1949 — теория информации К. Шеннона и У. Уивера. В 1948 году была опубликована знаменитая «Кибернетика» Норберта Винера — в русском переводе «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине».

2.2 Основные понятия теории систем

2.2.1 Определение понятия «система», «элемент», «внешняя среда»

Для кибернетических систем управления объектом исследования является не «физическая реальность», а «система», т.е. абстрактная формальная взаимосвязь между основными признаками и свойствами.

Согласно общей теории систем все объекты природы и общества являются системами. Система в переводе с греческого означает «целое, составленное из частей». В современном научном понимании системой называют отграниченную совокупность взаимодействующих между собой относительно элементарных частей, объединенных в единое целое выполнением общей функции, несводимой к функциям отдельных компонентов. Элементом называют составную часть системы, которая в условиях рассмотрения считается неделимой. Иногда выделяют подсистему как составную часть системы, которая в условиях рассмотрения считается делимой на элементы, по отношению к которым она выступает как система. В приведенном определении системы можно выделить следующие основные признаки системности: структурированность, взаимосвязанность составляющих систему частей, целостность, обособленность, подчиненность организации всей системы определенной цели.

В категориях философии понятия «элемент» и «система» соотносятся как часть и целое. В изучении взаимоотношений этих понятий существуют два принципиальных подхода: редукционизм и интегратизм. Основной тезис редукционизма состоит в следующем: «Целое всегда равно сумме своих частей», то есть в этом подходе предполагается возможность экстраполяции информации, полученной на основе изучения её частей на всю систему. Интегратизм отвергает такую возможность, утверждая: «Целое всегда больше своих частей». Совокупность и взаимодействие частей (элементов) создает у целого (системы) некоторые новые качества, отсутствующие у исходных частей (элементов). Такие новые качества определяются как эмерджентные свойства системы (в буквальном смысле – вновь появляющиеся, непредвиденные свойства). И сама жизнь может рассматриваться как эмерджентное, качественно новое свойство, появляющееся на определенном уровне системной организации. В таком подходе особое внимание уделяется изучению связей в системе, поскольку предполагается, что именно они детерминируют основные свойства системы.

Объектом применения системного подхода является часть реального мира, которая выделяется и воспринимается как единое целое в течение длительного времени. Объект может быть как материальным, так и абстрактным, естественным или искусственным. Реальный объект обладает бесконечным набором свойств различной природы. Практически в процессе познания взаимодействие осуществляется с ограниченным множеством свойств, лежащих в границах возможности их восприятия и необходимости для цели познания. Поэтому система как отображение объекта задаётся на конечном множестве отобранных для наблюдения свойств.

Системный подход в описании объекта исследования заключается в неко-

торых аспектах.

- Структурное представление — связано с выделением элементов системы и связей между ними.
- Функциональное представление систем — выделение совокупности функций (целенаправленных действий) системы и её компонентов направленное на достижение определённой цели.
- Макроскопическое представление — понимание системы как нерасчленимого целого, взаимодействующего с внешней средой.
- Микроскопическое представление основано на рассмотрении системы как совокупности взаимосвязанных элементов. Оно предполагает раскрытие структуры системы.
- Иерархическое представление основано на понятии подсистемы, получаемом при разложении (декомпозиции) системы, обладающей системными свойствами, которые следует отличать от её элемента — неделимого на более мелкие части (с точки зрения решаемой задачи). Система может быть представлена в виду совокупностей подсистем различных уровней, составляющую системную иерархию, которая замыкается снизу только элементами.
- Процессуальное представление предполагает понимание системного объекта как динамического объекта, характеризующегося последовательностью его состояний во времени.

Окружение системы, в котором она пребывает и с которым в той или иной степени взаимодействует, называется внешней или окружающей средой. Взаимодействие системы со средой осуществляется посредством пограничной поверхности. Понятие «пограничной поверхности» очень условно, так как может выражать различную по природе форму изоляции. Понятие «система» возникает там, когда мы материально или умозрительно проводим замкнутую границу между неограниченным или некоторым ограниченным множеством элементов. Те элементы с их соответствующим взаимодействием, которые попадают внутрь, — образуют систему.

Элементы, которые остались за пределами границы называются в теории систем «системным окружением» или просто «окружением», или «внешней средой». На основании этого видно, что невозможно рассматривать систему без внешней среды. Система формирует и проявляет свои свойства именно в

процессе взаимодействия с окружением, являясь при этом ведущим компонентом этого воздействия.

В зависимости от вида воздействия на окружение, а также характера взаимодействия с другими системами, функции систем можно ранжированно расположить следующим образом:

- пассивное существование;
- материал для других систем;
- обслуживание систем более высокого порядка;
- противостояние другим системам (выживание);
- поглощение других систем (экспансия);
- преобразование других систем и сред (активная роль).

Всякая система может рассматриваться, с одной стороны, как подсистема более высокого порядка (надсистемы), а с другой, как надсистема системы более низкого порядка (подсистема). Например, система «клетка» входит как подсистема в систему более высокого ранга — «организм». В свою очередь, надсистема «организм» может являться подсистемой «экосистема».

Обычно в качестве подсистем фигурирует более или менее самостоятельные части систем, выделяемые по определённым признакам, обладающие относительной самостоятельностью, определённой степенью свободы.

Компонент — любая часть системы, вступающая в определённые отношения с другими частями (подсистемами, элементами). Элементом системы является часть системы с однозначно определёнными свойствами, выполняющие определённые функции и не подлежащие дальнейшему разбиению в рамках решаемой задачи (с точки зрения исследователя).

Понятие элемент, подсистема, система взаимопреобразуемы, система может рассматриваться как элемент системы более высокого порядка (метасистема), а элемент при углубленном анализе, как система. Это приводит к 2 аспектам изучения систем: на макро- и микро- уровнях.

При изучение на макроуровне основное внимание уделяется взаимодействию системы с внешней средой. Причём системы более высокого уровня можно рассматривать как часть внешней среды. При таком подходе главными факторами являются целевая функция системы (цель), условия её функционирования. При этом элементы системы изучаются с точки зрения организации их в единое целое, влияние на функции системы в целом.

На микроуровне основными становятся внутренние характеристики системы, характер взаимодействия элементов между собой, их свойства и условия функционирования. При изучении системы как правило сочетаются оба компонента.

2.2.2 Структура системы

Под структурой системы понимается устойчивое множество отношений, которое сохраняется неизменным, как минимум в течение интервала наблюдения.

Связи — это элементы, осуществляющие непосредственное взаимодействие между элементами (или подсистемами) системы, а также с элементами и подсистемами окружения.

Связь — одно из основных понятий в теории систем. Система как единое целое существует именно благодаря наличию связей между её элементами, т.е., иными словами, связи выражают законы функционирования системы. По характеру проявления связи различают как прямые и обратные, а по виду описания — как детерминированные и вероятностные.

Прямые связи предназначены для заданной функциональной передачи вещества, энергии, информации или их комбинаций — от одного элемента к другому в направлении основного процесса.

Обратные связи, в основном, выполняют осведомляющие функции, отражая изменение состояния системы в результате управляющего воздействия на нее. Открытие принципа обратной связи явилось выдающимся событием в развитии техники с исключительно важными последствиями. Без использования обратных связей невозможны такие процессы как управление, адаптация, саморегулирование, самоорганизация и развитие.

С помощью обратной связи сигнал или информация с выхода системы (объекта управления) передается в орган управления. Этот сигнал содержит информацию о работе, выполненной объектом управления. В органе управления сигнал обратной связи сравнивается с сигналом из памяти, задающим содержание и объем работы. В случае возникновения рассогласования между фактическим и плановым состоянием работы принимаются меры по его устранению. Основными функциями обратной связи являются:

- противодействие тому, что делает сама система, когда она выходит за установленные пределы (например, реагирование на снижение качества);
- компенсация возмущений и поддержание состояния устойчивого равновесия системы (например, неполадки в работе оборудования);

- синтезирование внешних и внутренних возмущений, стремящихся вывести систему из состояния устойчивого равновесия, сведение этих возмущений к отклонениям одной или нескольких управляемых величин (например, выработка управляющих команд на одновременное появление нового конкурента и снижение качества выпускаемой продукции);
- выработка управляющих воздействий на объект управления по плохо формализуемому закону. Например, установление более высокой цены на энергоносители вызывает в деятельности различных организаций сложные изменения, меняют конечные результаты их функционирования, требуют внесения изменений в производственно-хозяйственный процесс путем воздействий, которые невозможно описать с помощью аналитических выражений.

Нарушение обратных связей в системах по различным причинам ведет к тяжелым последствиям. Отдельные локальные системы утрачивают способность к эволюции и тонкому восприятию намечающихся новых тенденций, перспективному развитию и эффективному приспособлению к постоянно меняющимся условиям внешней среды.

Особенностью биологических систем является то обстоятельство, что не всегда удается четко выразить обратные связи, которые в них, как правило, длинные, проходят через целый ряд промежуточных звеньев, и четкая их идентификация затруднена. Сами управляемые величины нередко не поддаются ясному определению, и трудно установить множество ограничений, накладываемых на параметры управляемых величин. Не всегда известны также действительные причины выхода управляемых переменных за установленные пределы.

Детерминированная (жесткая) связь, как правило, однозначно определяет причину и следствие, дает четко обусловленную формулу взаимодействия элементов. Вероятностная (гибкая) связь определяет неявную, косвенную зависимость между элементами системы. Теория вероятности предлагает математический аппарат для исследования этих связей, называемый «корреляционными зависимостями».

Критерии — признаки, по которым производится оценка соответствия функционирования системы желаемому результату (цели) при заданных ограничениях.

Эффективность системы — соотношение между заданным (целевым) показателем результата функционирования системы и фактически реализованным.

Функционирование любой произвольно выбранной системы состоит в переработке входных (известных) параметров и известных параметров воздей-

ствия окружающей среды в значения выходных (неизвестных) параметров с учетом факторов обратной связи.

Вход — все, что изменяется при протекании процесса (функционирования) системы.

Выход — результат конечного состояния процесса.

Процессор — перевод входа в выход.

Система осуществляет свою связь со средой следующим образом. Вход данной системы является в то же время выходом предшествующей, а выход данной системы — входом последующей. Таким образом, вход и выход располагаются на границе системы и выполняют одновременно функции входа и выхода предшествующих и последующих систем.

Обратная связь — предназначена для выполнения следующих операций:

- сравнение данных на входе с результатами на выходе с выявлением их качественно-количественного различия;
- оценка содержания и смысла различия;
- выработка решения, вытекающего из различия;
- воздействие на ввод.

Ограничение — обеспечивает соответствие между выходом системы и требованием к нему, как к входу в последующую систему — потребитель. Если заданное требование не выполняется, ограничение не пропускает его через себя. Ограничение, таким образом, играет роль согласования функционирования данной системы с целями (потребностями) потребителя.

Определение функционирования системы связано с понятием «проблемной ситуации», которая возникает, если имеется различие между необходимым (желаемым) выходом и существующим (реальным) входом.

Проблема — это разница между существующей и желаемой системами. Если этой разницы нет, то нет и проблемы. Решить проблему — значит скорректировать старую систему или сконструировать новую, желаемую.

Состоянием системы называется совокупность существенных свойств, которыми система обладает в каждый момент времени.

2.3 Свойства систем

Как уже было отмечено, состоянием системы называется совокупность существенных свойств, которыми система обладает в каждый момент времени. Под свойством понимают сторону объекта, обуславливающую его отличие от

других объектов или сходство с ними и проявляющуюся при взаимодействии с другими объектами. Характеристика — то, что отражает некоторое свойство системы.

Из определения «системы» следует, что главным свойством системы является целостность, единство, достигаемое посредством определенных взаимосвязей и взаимодействий элементов системы и проявляющиеся в возникновении новых свойств, которыми элементы системы не обладают. Это свойство эмерджентности (от англ. emerge — возникать, появляться).

Суть данного понятия можно определить следующим образом:

- степень несводимости свойств системы к свойствам элементов, из которых она состоит;
- свойство систем, обуславливающее появление новых свойств и качеств, не присущих элементам, входящим в состав системы;
- принцип противоположный редукционизму, который утверждает, что целое можно изучать, расчленив его на части и затем, определяя их свойства, определить свойства целого.

Свойству эмерджентности близко свойство целостности системы. Однако их нельзя отождествлять. Целостность системы означает, что каждый элемент системы вносит вклад в реализацию целевой функции системы. Целостность и эмерджентность обуславливают интегративные свойства системы. Наличие интегративных свойств является одной из важнейших черт системы. Целостность проявляется в том, что система обладает собственной закономерностью функциональности, собственной целью.

Организованность — сложное свойство систем, заключающиеся в наличие структуры и функционирования (поведения). Непременной принадлежностью систем является их компоненты, именно те структурные образования, из которых состоит целое и без чего оно не возможно.

Функциональность — это проявление определенных свойств (функций) при взаимодействии с внешней средой. Здесь же определяется цель (назначение системы) как желаемый конечный результат.

Структурность — это упорядоченность системы, определенный набор и расположение элементов со связями между ними. Между функцией и структурой системы существует взаимосвязь, как между философскими категориями содержанием и формой. Изменение содержания (функций) влечет за собой изменение формы (структуры), но и наоборот.

Важным свойством системы является наличие поведения — действия, изменений, функционирования и т.д. Поведение системы связано со средой

(окружающей), т.е. с другими системами с которыми она контактирует или вступает в определенные взаимоотношения. Процесс целенаправленного изменения во времени состояния системы называется поведением. В отличие от управления, когда изменение состояния системы достигается за счет внешних воздействий, поведение реализуется исключительно самой системой, исходя из собственных целей.

Поведение каждой системы объясняется структурой систем низшего порядка, из которых состоит данная система, и наличием признаков равновесия (гомеостаза). В соответствии с признаком равновесия система имеет определенное состояние (состояния), которое является для неё предпочтительным. Поэтому поведение систем описывается в терминах восстановления этих состояний, когда они нарушаются в результате изменения окружающей среды.

Еще одним свойством является свойство роста (развития). Развитие можно рассматривать как составляющую часть поведения (при этом важнейшим). Одним из основополагающих атрибутов системного подхода является недопустимость рассмотрения объекта вне его развития, под которым понимается необратимое, направленное, закономерное изменение материи и сознания. В результате возникает новое качество или состояние объекта. Отождествление терминов «развитие» и «движение» позволяет выразиться в таком смысле, что вне развития немисливо существование материи, в данном случае — системы. Следует помнить, что развитие не происходит стихийно. В множестве процессов, кажущихся на первый взгляд чем-то вроде броуновского движения, при пристальном внимании и изучении вначале проявляются общие тенденции, а затем и устойчивые закономерности. Эти закономерности по природе своей действуют объективно, т.е. не зависят от того, желаем ли мы их проявления или нет. Поведение системы определяется характером реакции на внешние воздействия.

Фундаментальным свойством систем является устойчивость, т.е. способность системы противостоять внешним возмущающим воздействиям. От неё зависит продолжительность жизни системы. Простые системы имеют пассивные формы устойчивости: прочность, сбалансированность, регулируемость, гомеостаз. А для сложных определяющими являются активные формы: надежность, живучесть и адаптируемость.

Если перечисленные формы устойчивости простых систем (кроме прочности) касаются их поведения, то определяющая форма устойчивости сложных систем носят в основном структурный характер.

Надежность — свойство сохранения структуры систем, несмотря на гибель отдельных её элементов с помощью их замены или дублирования, а живучесть — как активное подавление вредных качеств. Таким образом, надежность является более пассивной формой, чем живучесть.

Адаптируемость — свойство изменять поведение или структуру с целью сохранения, улучшения или приобретения новых качеств в условиях изменения внешней среды. Обязательным условием возможности адаптации является наличие обратных связей. Всякая реальная система существует в среде. Связь между ними бывает настолько тесной, что определять границу между ними становится сложно. Поэтому выделение системы из среды связано с той или иной степенью идеализации.

Можно выделить два аспекта взаимодействия: во многих случаях принимает характер обмена между системой и средой (веществом, энергией, информацией); среда обычно является источником неопределенности для систем. Воздействие среды может быть пассивным либо активным (антагонистическим, целенаправленно противодействующее системе). Поэтому в общем случае среду следует рассматривать не только безразличную, но и антагонистическую по отношению к исследуемой системе.

2.4 Классификация систем

Классификацией называется разбиение на классы по наиболее существенным признакам. Под классом понимается совокупность объектов, обладающие некоторыми признаками общности. Признак или совокупность признаков является основанием для классификации.

Система может быть охарактеризована одним или несколькими признаками и соответственно ей может быть найдено место в различных классификациях, каждая из которых может быть полезной при выборе методологии исследования. Обычно цель классификации ограничить выбор подходов к отображению систем, выработать язык описания, подходящий для соответствующего класса.

По содержанию различают реальные (материальные), объективно существующие, и абстрактные (концептуальные, идеальные), являющиеся продуктом мышления.

Реальные системы делятся на естественные (природные системы) и искусственные (антропогенные). Естественные системы: системы неживой (физические, химические) и живой (биологические) природы. Искусственные системы: создаются человечеством для своих нужд или образуются в результате целенаправленных усилий. Искусственные делятся на технические (техно-экономические) и социальные (общественные). К социальным системам относятся различные системы человеческого общества. Техническая система спроектирована и изготовлена человеком в определенных целях. Отличительными признаками технических систем по сравнению с произвольной совокупностью

объектов или по сравнению с отдельными элементами является конструктивность (практическая осуществимость отношений между элементами), ориентированность и взаимосвязанность составных элементов и целенаправленность. Выделение систем, состоящих из одних только технических устройств почти всегда условно, поскольку они не способны вырабатывать свое состояние. Эти системы выступают как части более крупных, включающие людей, организационно-технических систем. Организационная система, для эффективного функционирования которой существенным фактором является способ организации взаимодействия людей с технической подсистемой, называется человеко-машинной системой. Примеры человеко-машинных систем: автомобиль — водитель; самолет — летчик; ЭВМ — пользователь и т.д.

Абстрактные системы являются результатом отражения действительности (реальных систем) в мозге человека. Их построение — необходимая ступень обеспечения эффективного взаимодействия человека с окружающим миром. Абстрактные (идеальные) системы объективны по источнику происхождения, поскольку их первоисточником является объективно существующая действительность. Абстрактные системы разделяют на системы непосредственного отображения (отражающие определенные аспекты реальных систем) и системы генерализирующего (обобщающего) отображения. К первым относятся математические и эвристические модели, а ко вторым — концептуальные системы (теории методологического построения) и языки.

По взаимодействию с окружающей средой выделяют открытые, закрытые и комбинированные. Все реальные системы являются открытыми. Открытая система связана со средой определенными коммуникациями — сетью внешних связей системы. Выделение внешних связей и описание механизмов взаимодействия «система-среда» является центральной задачей теории открытых систем. Рассмотрение открытых систем позволяет расширить понятие структуры системы. Для открытых систем оно включает не только внутренние связи между элементами, но и внешние связи со средой. При описании структуры внешние коммуникационные каналы стараются разделить на входные (по которым среда воздействует на систему) и выходные (наоборот). Совокупность элементов этих каналов, принадлежащих собственной системе называются входными и выходными полюсами системы. У открытых систем, по крайней мере, один элемент имеет связь с внешней средой, по меньшей мере, один входной полюс и один выходной, которыми она связана с внешней средой.

Важно подчеркнуть, что в любой реальной системе число всех взаимосвязей огромно. Таким образом, учесть и исследования абсолютно все связи невозможно и нецелесообразно, так как среди них есть много несущественных, практически не влияющих на функционирование системы и количество

полученных решений. Если изменение характеристик связи, её исключение (полный разрыв) приводят к значительному ухудшению работы системы, снижению эффективности, то такая связь — существенна. Одна из важнейших задач исследователя — выделить существенные для рассмотрения системы в условиях решаемой задачи связи и отделить их от несущественных. В связи с тем, что входные и выходные полюса системы не всегда удается четко выделить, приходится прибегать к определенной идеализации действий. Наибольшая идеализация имеет место при рассмотрении закрытой системы.

Закрытой называется система, которая не взаимодействует со средой или взаимодействует со средой строго определенным образом. В первом случае предполагается, что система не имеет входных полюсов, а во втором, что входные полюса есть, но воздействие среды носит неизменный характер и заранее полностью известно. Очевидно, что при последнем предположении указанные воздействия могут быть отнесены собственно к системе, и её можно рассматривать, как закрытую. Для закрытой системы, любой её элемент имеет связи только с элементами самой системы.

Разумеется, закрытые системы представляют собой некоторую абстракцию реальной ситуации, так как, строго говоря, изолированных систем не существует. Однако, очевидно, что упрощение описания системы, заключающееся в отказе от внешних связей, может привести к полезным результатам, упростить исследование системы.

Комбинированные системы содержат открытые и закрытые подсистемы. Наличие комбинированных систем свидетельствует о сложной комбинации открытой и закрытой подсистем.

В зависимости от структуры и пространственно-временных свойств системы делятся на простые, сложные и очень сложные.

Простые — системы, не имеющие разветвленных структур, состоящие из небольшого количества взаимосвязей и небольшого количества элементов. Такие элементы служат для выполнения простейших функций, в них нельзя выделить иерархические уровни. Отличительной особенностью простых систем является детерминированность (четкая определенность) номенклатуры, числа элементов и связей как внутри системы, так и со средой.

Сложные системы характеризуются большим числом элементов и внутренних связей, их неоднородностью и разнокачественностью, структурным разнообразием, выполняют сложную функцию или ряд функций. Познание таких систем требует совместного привлечения многих моделей теорий, а в некоторых случаях многих научных дисциплин, а также учета неопределенности вероятностного и невероятностного характера. Наиболее характерным проявлением этого определения является многомодельность. Признаки сложности:

- структурная сложность — определяется по числу элементов системы, числу и разнообразию типов связей между ними, количеству иерархических уровней и общему числу подсистем системы. Основными типами считаются следующие виды связей: структурные (в том числе, иерархические), функциональные, каузальные (причинно-следственные), информационные, пространственно-временные;
- сложность функционирования — определяется характеристиками множества состояний, правилами перехода из состояния в состояние, воздействие системы на среду и среды на систему, степенью неопределенности перечисленных характеристик и правил;
- сложность выбора поведения — в многоальтернативных ситуациях, когда выбор поведения определяется целью системы, гибкостью реакций на заранее неизвестные воздействия среды;
- сложность развития — определяемая характеристиками эволюционных или скачкообразных процессов. Сложные системы можно подразделить на следующие факторные подсистемы:
 - решающую, которая принимает глобальные решения во взаимодействии с внешней средой и распределяет локальные задания между всеми другим подсистемами;
 - информационную, которая обеспечивает сбор, переработку и передачу информации, необходимой для принятия глобальных решений и выполнения локальных задач;
 - управляющую для реализации глобальных решений;
 - гомеостазную, поддерживающую динамическое равновесие внутри систем и регулирующую потоки энергии и вещества в подсистемах;
 - адаптивную, накапливающую опыт в процессе обучения для улучшения структуры и функций системы.

Большой системой называют систему, ненаблюдаемую одновременно с позиции одного наблюдателя во времени или в пространстве, для которой существенен пространственный фактор, число подсистем которой очень велико, а состав разнороден.

Основополагающими при анализе и синтезе больших и сложных систем являются процедуры декомпозиции и агрегирования. Декомпозиция и агрегирование представляют собой две противоположные стороны подхода к

рассмотрению больших и сложных систем, применяемые в диалектическом единстве. Декомпозиция — разделение систем на части, с последующим самостоятельным рассмотрением отдельных частей. Очевидно, что декомпозиция представляет собой понятие, связанное с моделью, так как сама система не может быть расчленена без нарушений свойств. На уровне моделирования, разрозненные связи заменяются соответственно эквивалентами, либо модели систем строятся так, что разложение её на отдельные части при этом оказывается естественным. Применительно к большим и сложным системам декомпозиция является мощным инструментом исследования.

Агрегирование является понятием, противоположным декомпозиции. В процессе исследования возникает необходимость объединения элементов системы с целью рассмотреть её с более общих позиций.

По поведению во времени системы разделяют на детерминированные — состояние которых однозначно определяется начальными значениями и может быть предсказано для любого последующего момента времени, и стохастические — изменения в которых носят случайный характер.

По степени организованности: хорошо организованные и диффузные. Представить анализируемый объект или процесс в виде хорошо организованной системы означает определить элементы системы, их взаимосвязь, правила объединения в более крупные компоненты. Решение задачи при представлении её в виде хорошо организованной системы осуществляется аналитическими методами формализованного представления системы. Описание объекта в виде хорошо организованной системы применяется в тех случаях, когда можно предложить детерминированное описание и экспериментально доказать правомерность его применения, адекватность модели реальному процессу. Попытки применить класс хорошо организованных систем для представления сложных многокомпонентных объектов или многокритериальных задач плохо удаются: они требуют недопустимо больших затрат времени, практически нереализуемы и неадекватны применяемым моделям.

При представлении объекта в виде плохо организованной или диффузной системы не ставится задача определить все учитываемые компоненты, их свойства и связи между ними и целями системы. Система характеризуется некоторым набором макропараметров и закономерностями, которые находятся на основе исследования не всего объекта или класса явлений, а на основе определенной с помощью некоторых правил выборки компонентов, характеризующих исследуемый объект или процесс. На основе такого выборочного исследования получают характеристики или закономерности (статистические, экономические) и распространяют их на всю систему в целом. При этом делаются соответствующие оговорки. Например, при получении статистических закономерностей их распространяют на поведение всей системы

с некоторой доверительной вероятностью. Подход к отображению объектов в виде диффузных систем широко применяется при описании систем массового обслуживания, определении численности штатов на предприятиях и учреждениях, исследовании документальных потоков информации в системах управления и т. д.

С точки зрения характера функций различаются специальные, многофункциональные, и универсальные системы. Для специальных систем характерна единственность назначения и узкая профессиональная специализация обслуживающего персонала (сравнительно несложная). Многофункциональные системы позволяют реализовать на одной и той же структуре несколько функций. Пример: производственная система, обеспечивающая выпуск различной продукции в пределах определенной номенклатуры. Для универсальных систем: реализуется множество действий на одной и той же структуре, однако состав функций по виду и количеству менее однороден (менее определен).

По характеру развития выделяют два класса систем: стабильные и развивающиеся. У стабильной системы структура и функции практически не изменяются в течение всего периода её существования и, как правило, качество функционирования стабильных систем по мере изнашивания их элементов только ухудшается. Восстановительные мероприятия обычно могут лишь снизить темп ухудшения.

Отличной особенностью развивающихся систем является то, что с течением времени их структура и функции приобретают существенные изменения. Функции системы более постоянны, хотя часто они могут и видоизменяются. Практически неизменными остается лишь их назначение. Развивающиеся системы имеют более высокую сложность.

В порядке усложнения поведения системы бывают автоматические, решающие, самоорганизующиеся, предвидящие, превращающиеся. Автоматические однозначно реагируют на ограниченный набор внешних воздействий, внутренняя их организация приспособлена к переходу в равновесное состояние при выводе из него (гомеостаз). Решающие имеют постоянные критерии различения их постоянной реакции на широкие классы внешних воздействий. Постоянство внутренней структуры поддерживается заменой вышедших из строя элементов. Самоорганизующиеся имеют гибкие критерии различения и гибкие реакции на внешние воздействия, приспособляющиеся к различным типам воздействия. Устойчивость внутренней структуры высших форм таких систем обеспечивается постоянным самовоспроизводством.

Самоорганизующиеся системы обладают признаками диффузных систем: стохастичностью поведения, нестационарностью отдельных параметров и процессов. К этому добавляются такие признаки, как способность адаптиро-

ваться к изменяющимся условиям среды, изменять структуру при взаимодействии системы со средой, сохраняя при этом свойства целостности; способность формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучший и др. Иногда этот класс разбивают на подклассы, выделяя адаптивные или самоприспосабливающиеся системы, самовосстанавливающиеся, самовоспроизводящиеся и другие подклассы, соответствующие различным свойствам развивающихся систем.

Если устойчивость по своей сложности начинает превосходить сложные воздействия внешнего мира — это предвидящие системы: она может предвидеть дальнейший ход взаимодействия. Превращающиеся — это воображаемые сложные системы на высшем уровне сложности, не связанные постоянством существующих носителей. Они могут менять вещественные носители, сохраняя свою индивидуальность. Науке примеры таких систем пока не известны.

Систему можно разделить на виды по признакам структуры их построения и значимости той роли, которую играют в них отдельные составные части в сравнение с ролями других частей.

В некоторых системах одной из частей может принадлежать доминирующая роль и такой компонент будет выступать как центральный, определяющий функционирование всей системы. Такие системы называют централизованными. В других системах все составляющие их компоненты примерно одинаково значимы. Структурно они расположены не вокруг некоторого централизованного компонента, а взаимосвязаны последовательно или параллельно и имеют примерно одинаковые значения для функционирования системы. Это децентрализованные системы.

Системы можно классифицировать по назначению. Среди технических и организационных систем выделяют: производящие, управляющие, обслуживающие.

В производящих системах реализуются процессы получения некоторых продуктов или услуг. Производящие системы могут быть вещественно-энергетическими, в которых осуществляется преобразование природной среды или сырья в конечный продукт вещественной или энергетической природы, или информационными, предназначенными для сбора, передачи и преобразования информации, предоставление информационных услуг. Назначение управляющих систем — организация и управление вещественно-энергетическими и информационными процессами. Обслуживающие системы занимаются поддержкой заданных пределов работоспособности производящих и управляющих систем.

2.5 Закономерности системной организации, лежащие в основе исследования и моделирования систем

Основными закономерностями организации, лежащими в основе моделирования систем, являются: целостность, структурность, осуществимость, историчность, самоорганизация, целеполагание.

Целостность Под целостностью понимается способность сохранять структуру взаимодействия элементов при изменениях внешних условий и внутреннего состояния, сохранять свои главные черты в процессе эволюции.

Одной из ключевых проблем естествознания является проблема возникновения качественно нового на более высоком уровне организации материи. Группа учений об органической целостности и возникновении новых качеств при повышении уровней организации объединены в организмические теории. Главные из этих теорий — органицизм, теория эмергентной эволюции, гештальт-психология, холизм и органический индетерминизм. В 40-х годах XX-го века сложилась теория интегративных уровней организации. В основу этой теории легли идеи Р.В. Селларса, Г.Ч. Брауна, Р. Джерарда, Эмерсона, Хауэлса и др. биологов, философов, социологов. Наиболее четко эта теория представлена в работах биолога А.Б.Новикова. Теория интегративных уровней организации представляет собой общее описание эволюции материи, проходящей последовательные и все более высокие порядки сложности и интеграции.

Закономерность целостности/эмерджентности проявляется в системе в появлении у неё новых свойств, отсутствующих у элементов. Для того чтобы глубже понять закономерность целостности, необходимо, прежде всего, учитывать две её стороны:

- свойства системы (целого) не является простой суммой свойств составляющих её элементов (частей);
- свойства системы (целого) зависят от свойств составляющих её элементов (частей).

То есть, каждый новый уровень организации возникает не посредством разрушения образований предыдущего уровня, а посредством «наложения» на них процессов объединения и организации таких единиц в единую систему. Таким образом, то, что было ранее целым, становится частью целого более высокого порядка. Причем каждому новому уровню присущи свойства, не

сводимые к сумме свойств предыдущих уровней. Кроме этих двух основных сторон, следует иметь в виду, что объединенные в систему элементы, как правило, утрачивают часть своих свойств, присущих им вне системы, т.е. система как бы подавляет ряд свойств элементов.

Термин «интегратизм» часто употребляется как синоним целостности. Однако некоторые исследователи выделяют эту закономерность как самостоятельную, стремясь подчеркнуть интерес не к внешним факторам проявления целостности, а к более глубоким причинам, обуславливающим возникновение этого свойства, к факторам, обеспечивающим сохранение целостности.

Структурность Организацию системы составляет вся совокупность структурных и функциональных отношений и взаимодействий. Структурность является неотъемлемым атрибутом материи. Природа и общество обнаруживают значительное разнообразие объектов, характеризующихся развитыми внутренними и внешними связями. Главные качественные различия материальных объектов, процессов их деятельности и преемственных изменений, составляющих процессы развития, соответствуют крупным градациям организованности, представляющих собой ступени общего процесса развития материи. Таким образом, закономерность уровневой структурной организации материи отображает единство материального мира и его многообразие, специфические особенности и отношения различных ступеней развития. Особенно ярко взаимосвязь организации и развития выражена в живой природе.

Иерархическая упорядоченность систем характеризует и взаимодействие системы с её окружением — со средой (значимой или существенной для системы), надсистемой, подчиненными системами.

Коммуникативность. Эта закономерность составляет основу определения системы, где система не изолирована от других систем, она связана множеством коммуникаций со средой, представляющей собой, в свою очередь, сложное и неоднородное образование, содержащее надсистему (метасистему — систему более высокого порядка, задающую требования и ограничения исследуемой системе), подсистемы (нижележащие, подведомственные системы), и системы одного уровня с рассматриваемой. Такое сложное единство со средой названо закономерностью коммуникативности, которая, в свою очередь легко помогает перейти к иерархичности как закономерности построения всего мира и любой выделенной из него системы.

Иерархичность. Закономерности иерархичности или иерархической упорядоченности были в числе первых закономерностей теории систем, которые выделил и исследовал Л. фон. Бергаланфи.

Необходимо учитывать не только внешнюю структурную сторону иерар-

хии, но и функциональные взаимоотношения между уровнями. Например, в биологических организациях более высокий иерархический уровень оказывает направляющее воздействие на нижележащий уровень, подчиненный ему, и это воздействие проявляется в том, что подчиненные члены иерархии приобретают новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии (подтверждение положения о влиянии целого на элементы, приведенного выше), а в результате появления этих новых свойств формируется новый, другой «облик целого» (влияние свойств элементов на целое). Возникшее таким образом новое целое приобретает способность осуществлять новые функции, в чем и состоит цель образования иерархий.

Выделим основные особенности иерархической упорядоченности с точки зрения полезности их использования в качестве моделей системного анализа:

- В силу закономерности коммуникативности, которая проявляется не только между выделенной системой и её окружением, но и между уровнями иерархии исследуемой системы, каждый уровень иерархической упорядоченности имеет сложные взаимоотношения с вышестоящим и нижележащим уровнями. По метафорической формулировке, каждый уровень иерархии обладает свойством «двуликого Януса»: «лик», направленный в сторону нижележащего уровня, имеет характер автономного целого (системы), а «лик», направленный к узлу (вершине) вышестоящего уровня, проявляет свойства зависимой части (элемента вышестоящей системы). Эта конкретизация закономерности иерархичности объясняет неоднозначность использования в сложных организационных системах понятий «система» и «подсистема», «цель» и «средство» (элемент каждого уровня иерархической структуры целей выступает как цель по отношению к нижележащим и как «подцель», а начиная с некоторого уровня, и как «средство» по отношению к вышестоящей цели), что часто наблюдается в реальных условиях и приводит к некорректным терминологическим спорам.
- Важнейшая особенность иерархической упорядоченности как закономерности заключается в том, что закономерность целостности/эмерджентности (т.е. качественные изменения свойств компонентов более высокого уровня по сравнению с объединяемыми компонентами нижележащего) проявляется в ней на каждом уровне иерархии. При этом объединение элементов в каждом узле иерархической структуры приводит не только к появлению новых свойств у узла и утрате объединяемыми компонентами свободы проявления некоторых своих свойств, но и к тому, что каждый подчиненный член иерархии приобретает новые свойства, отсутствовавшие у него в изолированном состоянии.

Осуществимость систем Проблема осуществимости систем является наименее исследованной. Рассмотрим некоторые из закономерностей, помогающие понять эту проблему и учитывать её при определении принципов проектирования и организации функционирования систем управления.

Эквифинальность. Эквифинальность характеризует предельные возможности системы. Л. фон Берталанфи, предложивший этот термин, определил эквифинальность как «способность в отличие от состояния равновесия в закрытых системах, полностью детерминированных начальными условиями, ... достигать не зависящего от времени состояния, которое не зависит от её начальных условий и определяется исключительно параметрами системы».

В соответствии с данной закономерностью система может достигнуть требуемого конечного состояния, не зависящего от времени и определяемого исключительно собственными характеристиками системы при различных начальных условиях и различными путями. Это форма устойчивости по отношению к начальным и граничным условиям.

Закон «необходимого разнообразия». На необходимость учитывать предельную осуществимость системы при создании впервые в теории систем обратил внимание У.Р. Эшби. Он сформулировал закономерность, известную под названием закон «необходимого разнообразия».

Для задач принятия решений наиболее важным является одно из следствий этой закономерности, которое можно упрощенно пояснить на следующем примере.

Когда исследователь (ЛПР — лицо, принимающее решение, наблюдатель) N сталкивается с проблемой D , решение которой для него неочевидно, то имеет место некоторое разнообразие возможных решений V_d . Этому разнообразию противостоит разнообразие мыслей исследователя (наблюдателя) V_n . Задача исследователя заключается в том, чтобы свести разнообразие $V_d - V_n$ к минимуму, в идеале — к 0.

Эшби доказал теорему, на основе которой формулируется следующий вывод: «Если V_d дано постоянное значение, то $V_d - V_n$ может быть уменьшено лишь за счет соответствующего роста V_n только разнообразие в N может уменьшить разнообразие, создаваемое в D ; только разнообразие может уничтожить разнообразие».

Применительно к системам управления закон «необходимого разнообразия» может быть сформулирован следующим образом: разнообразие управляющей системы (системы управления) V_{su} должно быть больше (или, по крайней мере, равно) разнообразию управляемого объекта V_{ou} :

$$V_{su} > V_{ou}$$

Возможны следующие пути совершенствования управления при усложне-

нии производственных процессов:

- увеличение V_{su} , что может быть достигнуто путем роста численности аппарата управления, повышения его квалификации, механизации и автоматизации управленческих работ;
- уменьшение V_{ou} , за счет установления более четких и определенных правил поведения компонентов системы: унификация, стандартизация, типизация, введение поточного производства, сокращение номенклатуры деталей, узлов, технологической оснастки и т.п.;
- снижение уровня требований к управлению, т.е. сокращение числа постоянно контролируемых и регулируемых параметров управляемой системы;
- самоорганизация объектов управления путем ограничения контролируемых параметров с помощью создания саморегулирующихся подразделений (цехов, участков с замкнутым циклом производства, с относительной самостоятельностью и ограничением вмешательства централизованных органов управления предприятием и т.п.).

Историчность В последнее время все больше начинает осознаваться необходимость учета при моделировании систем принципов их изменения во времени, для понимания которых могут помочь рассматриваемые ниже закономерности. Хотя, казалось бы, очевидно, что любая система не может быть неизменной, что она не только возникает, функционирует, развивается, но и погибает, и каждый легко может привести примеры становления, расцвета, упадка (старения) и даже смерти (гибели) биологических и социальных систем, все же для конкретных случаев развития организационных систем и сложных технических комплексов трудно определить эти периоды. Не всегда руководители организаций и конструкторы технических систем учитывают, что время является непременной характеристикой системы, что каждая система подчиняется закономерности историчности, и что эта закономерность — такая же объективная, как целостность, иерархическая упорядоченность и др.

При этом закономерность историчности можно учитывать не только пассивно, фиксируя старение, но и использовать для предупреждения «смерти» системы, разрабатывая «механизмы» реконструкции, реорганизации системы для сохранения её в новом качестве.

Самоорганизация Термин «самоорганизация» был введен в научный обиход в начале 60-х годов XX-го века, в разгар интереса к кибернетике, как отражающая способность сложной динамической системы противостоять энтропийным факторам среды. Процесс самоорганизации, таким образом, характеризуется возрастанием упорядоченности системы и непосредственно связан с процессами самоуправления и энергоинформационным взаимодействием со средой. Самоорганизация характерна для сложных и очень сложных вероятностных систем. Структурными основаниями самоорганизации являются множественность элементов и разветвленность связей между ними, ведущих к возникновению целостности. А функциональным основанием — развитие гибкого взаимодействия между элементами по типу обратных связей, направленных на оптимизацию системы. Способностью к самоорганизации обладают системы живой и неживой природы, а также искусственные системы. В значительной степени иерархическую структуру живого можно рассматривать как следствие бифуркационных явлений в процессе самоорганизации.

Одним из фундаментальных принципов природы, отраженный во втором законе термодинамики, является принцип возрастания энтропии. Действительно в изолированной системе энтропия не изменяется при обратимых процессах и возрастает при необратимых процессах. Обратимыми процессами называются такие процессы, при которых систему можно вернуть в исходное состояние через те же самые промежуточные состояния. Реальные процессы, как правило, необратимы, так как сопровождаются диссипацией энергии (от лат. *Dissipatio* — рассеяние). В изолированной системе, при наличии диссипативных процессов, происходит хаотическое перераспределение частиц по всем возможным состояниям, т. е. система становится менее упорядоченной, поэтому её статистический вес и энтропия возрастают, стремясь к максимально возможному значению, которое достигается в равновесном состоянии системы.

В замкнутых системах существуют механизмы самопроизвольного упорядочивания. Например, физический процесс кристаллизации, химические реакции соединения атомов в молекулы, а молекул — в группы, объяснимые принципом минимизации потенциальной энергии физической системы. При этом образующиеся структуры остаются в устойчивом равновесном состоянии по отношению друг к другу. Описанные механизмы самоорганизации относятся только к объектам и процессам фундаментальной материи, неживой природы.

Живые организмы представляют собой открытые системы, так как они обмениваются с окружающей средой энергией, веществом и информацией. При этом они способны не только сохранять стационарное состояние, когда

прирост энтропии в системе равен нулю, но и снижать значение энтропии — повышать уровень организации. Следовательно, с позиций термодинамики, жизнь — это наименее вероятное состояние материи и механизмы её самоорганизации следует искать в рамках условий протекания неравновесных систем.

2.5.1 Механизмы самоорганизации в сильнонеравновесных системах

Теория сильнонеравновесных систем разрабатывалась с середины XX в научной школой И.Р. Пригожина. В 1977 г. И.Р. Пригожин сформулировал основные свойства систем в сильнонеравновесном состоянии: возникновение только в открытых системах; существование только в неравновесных условиях, причем при сильном удалении от положения равновесия; возникновение скачкообразно, путем резкого перехода системы от неупорядоченности к упорядоченности; существование в определенном диапазоне величин внешних воздействий, которые и выводят систему из первоначально равновесного положения. Необходимым условием существования этих структур является поступление в систему большого энергетического потока, превышающего определенное значение; именно поэтому такие структуры называются диссипативными (от лат. «диссипате» — рассеивать, терять). Физические процессы в таких структурах являются нелинейными, математическое описание диссипативных систем связано с решением нелинейных дифференциальных уравнений.

Огромное значение работы Пригожина имели для объяснения процессов самоорганизации в живой материи. Пригожин ввел понятие потока энтропии, как скорости изменения величины энтропии в единице объема системы в единицу времени, аналогичное понятию потока жидкости. На рисунке 5 приложения отображены схемы энтропийных потоков в системе. Уровень беспорядка в системе отражен уровнем «жидкости». Накопление энтропии в системе (dS_0) равно: $dS_0 = dS_{\text{пр}} + dS_{\text{вх}} - dS_{\text{вых}}$, где $dS_{\text{пр}}$ — поток производства энтропии, $dS_{\text{вх}}$ и $dS_{\text{вых}}$ — входящий и выходящие потоки энтропии. Величина равная $dS_{\text{вх}} - dS_{\text{вых}}$ названа энтропией обмена ($dS_{\text{обм}}$). Накопление энтропии в системе равно сумме энтропии, произведенной системой и обменной энтропии. При этом производство энтропии в системе внутри системы всегда положительно, то есть подчиняется второму закону термодинамики. Величина $dS_{\text{обм}}$ может иметь положительное и отрицательное значение.

Открытая система находится в стационарном состоянии, когда $dS_{\text{пр}} = -dS_{\text{обм}}$. Тогда накопление энтропии в системе $dS_0 = 0$. Такое состояние Берталанфи назвал состоянием текущего равновесия. Когда $dS_{\text{обм}} < 0$, а $dS_{\text{пр}} > |dS_{\text{обм}}|$ или $dS_{\text{пр}} \geq 0$, то энтропия в системе будет накапливаться,

$dS_0 > 0$. Если $dS_{\text{обм}} < 0$, а $dS_{\text{пр}} < |dS_{\text{обм}}|$, то $dS_0 < 0$. Таким образом открытая система может не только поддерживать уровень порядка (организации), но и повышать его ограничивая поток энтропии из внешней среды, уменьшая производство энтропии внутри системы или увеличивая поток энтропии из системы в окружающую среду.

Понятие самоорганизации вышло за рамки естествознания и приобрело общенаучный характер благодаря появлению синергетики, основателем которой считают немецкого ученого Г. Хакена. Согласно синергетическому подходу, выделяют ряд условий, необходимых для процессов самоорганизации.

1. Самоорганизующаяся система должна быть открытой — доступной для обмена веществом, энергией и информацией с внешней средой.
2. Система должна быть неравновесной, то есть находиться достаточно далеко от точки термодинамического равновесия (точка дезорганизации с максимальной энтропией), так как вблизи этой точки наступает необратимое скатывание к равновесному состоянию.
3. Образование нового порядка через флуктуации. В системе всегда возникают флуктуации — случайные отклонения от среднего положения. По законам саморегуляции они устраняются, но при достаточной неравновесности системы за счет свободной энергии отклонения усиливаются, наступает момент бифуркации — переломная точка в развитии системы, за которой возможно устойчивое отклонение от прежнего состояния. Прежний порядок исчезает, возникает и закрепляется новый порядок элементов в системе.
4. Самоорганизация ведет к новому порядку согласно принципу обратной положительной связи, по которому отклонения в системе не устраняются, а напротив, закрепляются и усиливаются.
5. Самоорганизация ведет к нарушению симметрии — структура и свойства системы до и после точки бифуркации не симметричны, то есть различаются в следствие необратимости процессов развития.
6. Самоорганизация возможна при некотором критическом количестве элементов в системе, достаточном для возникновения их кооперативного поведения. Путь к новому качеству возможен через изменение количества.

Наука о самоорганизации составляет в настоящее время основу для понимания эволюционных процессов в природе. Основная идея в том, что в

эволюции любых систем периоды упорядочивания строго чередуются с периодами хаотичности. Общенаучное значение имеет теория бифуркаций (от греч. раздвоение) сформулированная Л. Эйлером, и теория катастроф. Теории широко применяются не только в естествознании, но и в общественных науках.

Главные принципы синергетической методологии можно разбить на три группы.

Принципы сложности

1. **Принцип дополненности Н. Бора.** В сложных системах возникает необходимость сочетания различных, ранее казавшихся несовместимыми, а ныне взаимодополняющих друг друга моделей и методов описания.

2. **Принцип спонтанного возникновения И. Пригожина.** В сложных системах возможны особые критические состояния, когда малейшие флуктуации могут внезапно привести к появлению новых структур, полностью отличающихся от обычных (в частности, это может вести к катастрофическим последствиям — эффекты «снежного кома» или эпидемии).

Принципы неопределенности

3. **Принцип несовместимости Л. Заде.** При росте сложности системы уменьшается возможность её точного описания вплоть до некоторого порога, за которым точность и релевантность (смысловая связанность) информации становятся несовместимыми, взаимно исключающими характеристиками.

4. **Принцип управления неопределенностями.** В сложных системах требуется переход от борьбы с неопределенностями к управлению неопределенностями. Различные виды неопределенности должны преднамеренно вводиться в модель исследуемой системы, поскольку они служат фактором, благоприятствующим инновациям (системным мутациям).

5. **Принцип незнания.** Знания о сложных системах принципиально являются неполными, неточными и противоречивыми: они обычно формируются не на основе логически строгих понятий и суждений, а исходя из индивидуальных мнений и коллективных идей. Поэтому в подобных системах важную роль играет моделирование частичного знания и незнания.

6. **Принцип соответствия.** Язык описания сложной системы должен соответствовать характеру располагаемой о ней информации (уровню знаний или неопределенности). Точные логико-математические, синтаксические модели не являются универсальным языком, также важны нестрогие, приближенные, семиотические модели и неформальные методы. Один и тот же объект может описываться семейством языков различной жесткости.

Принципы эволюции

7. **Принцип разнообразия путей развития.** Развитие сложной систе-

мы многовариантно и альтернативно, существует «спектр» путей её эволюции. Переломный критический момент неопределенности будущего развития сложной системы связан с наличием зон бифуркации — «разветвления» возможных путей эволюции системы.

8. Принцип единства и взаимопереходов порядка и хаоса. Эволюция сложной системы проходит через неустойчивость; хаос не только разрушителен, но и конструктивен. Организационное развитие сложных систем предполагает своего рода конъюнкцию порядка и хаоса.

9. Принцип колебательной (пульсирующей) эволюции. Процесс эволюции сложной системы носит не поступательный, а циклический или волновой характер: он сочетает в себе дивергентные (рост разнообразия) и конвергентные (свертывание разнообразия) тенденции, фазы зарождения порядка и поддержания порядка. Открытые сложные системы пульсируют: дифференциация сменяется интеграцией, разбегание — сближением, ослабление связей — их усилением и т.п.

Целеполагание Цель выражает объективную необходимость и реальную возможность функционирования самоуправляемой системы, её элементов. Выделяют два этапа развертывания цели. На первом — этапе целеполагания — цель выступает внутренней информационной причиной. На втором — этапе целеосуществления — информационная причина переходит в свое следствие, то есть в фактическое поведение системы. При этом целевую причину называют исходной, а следствие этой причины — реализованной целью.

Выделяют внутренние и внешние цели. Внутренние цели являются выражением законов функционирования данной системы, внешние цели — цели других самоуправляемых систем. Эти цели могут совпадать, когда внешняя система является целым, в которое входит данная система, как часть. Например, цель сообщества животных организмов выражает потребности (внутренние цели) каждой особи. Внешние и внутренние цели не совпадают, когда внешняя цель реализуется за счет подавления рассматриваемой системы, то есть проявляет себя, как неблагоприятное воздействие со стороны окружающей среды. Например, плотоядные животные удовлетворяющие свои пищевые потребности за счет жертв.

Переход от целеполагания к целеосуществлению может быть планомерным и непланомерным, что во многом зависит от уровня организации системы. Непланомерный переход характеризуется жесткой причинно-следственной связью, поведение системы четко определено во времени и пространстве (летащие на огонь и погибающие бабочки, бьющиеся о стекло мухи). Большое значение для функционирования живых систем имеет планомерность перехода, отражающая тенденцию сохранения целостности системы, выживания

и развития. Это возможно в том случае, если причинно–следственная связь гибкая, существует возможность выбора оптимального перехода в конкретных условиях. Для осуществления такого перехода необходимы следующие условия: наличие обратных связей, позволяющих постоянно сравнивать исходную и реализованную цель; определенные пределы изменения внешних условий; своевременная модернизация исходной цели для выражения потребностей системы при изменении условий внешней среды; выбор средств для реализации всех целей системы по принципу сохранения функциональной целостности системы.

Обобщение результатов исследований процессов целеобразования, проводимых философами, психологами, кибернетиками, и наблюдение процессов обоснования и структуризации целей в конкретных условиях позволили сформулировать некоторые общие закономерности, которые полезно использовать на практике.

1. Зависимость формулировки цели от стадии познания объекта (процесса) и от времени. По мере развития представления об объекте цель может переформулироваться.
2. Зависимость цели от внешних и внутренних факторов. При анализе причин возникновения и формулирования целей нужно учитывать влияние как внешних, так и внутренних факторов.
3. Проявление в структуре целей закономерности целостности. В иерархической структуре закономерность целостности (эмерджентности) проявляется на любом уровне иерархии. Применительно к структуре целей это означает, что, с одной стороны, достижение цели вышестоящего уровня не может быть полностью обеспечено достижением подчиненных ей подцелей, хотя и зависит от них, а, с другой стороны, потребности, программы (как внешние, так и внутренние) нужно исследовать на каждом уровне структуризации. Получаемые разными ЛПР расчленения подцелей в силу различного раскрытия неопределенности могут оказаться разными, т.е. разные ЛПР могут предложить разные иерархические структуры целей и функций, даже при использовании одних и тех же принципов структуризации и методик.

Учитывая, что наиболее распространенным способом представления целей в системах организационного управления являются древовидные иерархические структуры («деревья целей»), рассмотрим основные рекомендации по их формированию:

- приемы, применяющиеся при формировании древовидных иерархий целей, можно свести к двум подходам: а) формирование структур «сверху» — методы структуризации, декомпозиции, целевой или целенаправленный подход, б) формирование структур целей «снизу» — морфологический, лингвистический, тезаурусный, терминальный подход; на практике обычно эти подходы сочетаются;
- цели нижележащего уровня иерархии можно рассматривать как средства для достижения целей вышестоящего уровня, при этом они же являются целями для уровня нижележащего по отношению к ним;
- в иерархической структуре по мере перехода с верхнего уровня на нижний происходит как бы смещение рассмотренной выше «шкалы» от цели-направления (цели-идеала, цели-мечты) к конкретным целям и функциям, которые на нижних уровнях структуры могут выражаться в виде ожидаемых результатов конкретной работы с указанием критериев оценки её выполнения, в то время как на верхних уровнях иерархии указание критериев может быть либо выражено в общих требованиях (например, «повысить эффективность»), либо вообще не приводится в формулировке цели;
- для того чтобы структура целей была удобной для анализа и организации управления, к ней рекомендуется предъявлять некоторые требования - число уровней иерархии и число компонентов в каждом узле должно соответствовать (в силу гипотезы Миллера или числа Колмогорова) $K = 5 \pm 2$ (предел восприятия человеком).

2.6 Структура системного анализа

2.6.1 Основные задачи системного анализа

Основные задачи системного анализа могут быть представлены в виде трех этапов: декомпозиция, анализ и синтез. На этапе декомпозиции, обеспечивающем общее представление системы, осуществляются:

- Определение и декомпозиция общей цели исследования и основной функции системы как ограничение траектории в пространстве состояний системы или в области допустимых ситуаций. Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций.

- Выделение системы из среды (разделение на систему/«несистему») по критерию участия каждого рассматриваемого элемента в процессе, приводящем к результату на основе рассмотрения системы как составной части надсистемы.
- Описание воздействующих факторов.
- Описание тенденций развития, неопределенностей разного рода.
- Описание системы как «черного ящика».
- Функциональная (по функциям), компонентная (по виду элементов) и структурная (по виду отношений между элементами) декомпозиции системы.

Глубина декомпозиции ограничивается. Декомпозиция должна прекращаться, если необходимо изменить уровень абстракции — представить элемент как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «черного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы и, следовательно, вызывает прекращение декомпозиции.

В автоматизированных методиках типичной является декомпозиция модели на глубину 5-6 уровней. На такую глубину декомпозируется обычно одна из подсистем. Функции, которые требуют такого уровня детализации, часто очень важны, и их детальное описание дает ключ к секретам работы всей системы.

В общей теории систем доказано, что большинство систем могут быть декомпоziрованы на базовые представления подсистем. К ним относят: последовательное (каскадное) соединение элементов, параллельное соединение элементов, соединение с помощью обратной связи.

Проблема проведения декомпозиции состоит в том, что в сложных системах отсутствует однозначное соответствие между законом функционирования подсистем и алгоритмом, его реализации. Поэтому осуществляется формирование нескольких вариантов (или одного варианта, если система отображена в виде иерархической структуры) декомпозиции системы.

Рассмотрим некоторые наиболее часто применяемые стратегии декомпозиции.

Функциональная декомпозиция базируется на анализе функций системы. При этом ставится вопрос что делает система, независимо от того, как она ра-

ботаает. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов.

Декомпозиция по жизненному циклу. Признак выделения подсистем — изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы «от рождения до гибели». Рекомендуются применять эту стратегию, когда целью системы является оптимизация процессов и когда можно определить последовательные стадии преобразования входов в выходы.

Декомпозиция по физическому процессу. Признак выделения подсистем — шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний. Хотя эта стратегия полезна при описании существующих процессов, результатом её часто может стать слишком последовательное описание системы, которое не будет в полной мере учитывать ограничения, диктуемые функциями друг другу. При этом может оказаться скрытой последовательность управления. Применять эту стратегию следует, только если целью модели является описание физического процесса как такового.

На этапе анализа, обеспечивающем формирование детального представления системы, осуществляются:

- Функционально-структурный анализ существующей системы, позволяющий сформулировать требования к создаваемой системе. Он включает уточнение состава и законов функционирования элементов, алгоритмов функционирования и взаимовлияний подсистем, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание пространства состояний Z , задание параметрического пространства T , в котором задано поведение системы, анализ целостности системы, формулирование требований к создаваемой системе.
- Морфологический анализ — анализ взаимосвязи компонентов.
- Генетический анализ — анализ предыстории, причин развития ситуации, имеющихся тенденций, построение прогнозов.
- Анализ аналогов.
- Анализ эффективности (по результативности, ресурсоемкости, оперативности). Он включает выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственно оценивание и анализ полученных оценок.

- Формирование требований к создаваемой системе, включая выбор критериев оценки и ограничений. Этап синтеза системы, решающей проблему, представлен в виде упрощенной функциональной диаграммы на рисунке. На этом этапе осуществляются:
- Разработка модели требуемой системы (выбор математического аппарата, моделирование, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей, многовариантности реализаций, блочности построения).
- Синтез альтернативных структур системы, снимающей проблему.
- Синтез параметров системы, снимающей проблему.
- Оценивание вариантов синтезированной системы (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка результатов оценивания, анализ результатов, выбор наилучшего варианта).

Оценка степени снятия проблемы проводится при завершении системного анализа. Наиболее сложными в исполнении являются этапы декомпозиции и анализа. Это связано с высокой степенью неопределенности, которую требуется преодолеть в ходе исследования.

2.6.2 Формирование общего и детального представления о системе

Процесс исследования систем включает 9 стадий. Первые шесть необходимы формирования общего представления о системе. Для детального анализа системы необходимы 3 дополнительные стадии исследования.

Стадия 1. Выявление главных функций (свойств, целей, предназначения) системы. Формирование (выбор) основных предметных понятий, используемых в системе. На этой стадии речь идет об уяснении основных выходов в системе. Именно с этого лучше всего начинать её исследование. Должен быть определен тип выхода: материальный, энергетический, информационный, они должны быть отнесены к каким-либо физическим или другим понятиям (выход производства — продукция (какая?), выход системы управления — командная информация (для чего? в каком виде?), выход автоматизированной информационной системы — сведения (о чем?) и т.д.).

Стадия 2. Выявление основных функций и частей (модулей) в системе. Понимание единства этих частей в рамках системы. На этой стадии происходит первое знакомство с внутренним содержанием системы, выявляется,

из каких крупных частей она состоит и какую роль каждая часть играет в системе. Это стадия получения первичных сведений о структуре и характере основных связей. Такие сведения следует представлять и изучать при помощи структурных или объектно-ориентированных методов анализа систем, где, например, выясняется наличие преимущественно последовательного или параллельного характера соединения частей, взаимной или преимущественно односторонней направленности воздействий между частями и т.п. Уже на этой стадии следует обратить внимание на так называемые системообразующие факторы, т.е. на те связи, взаимообусловленности, которые и делают систему системой.

Стадия 3. Выявление основных процессов в системе, их роли, условий осуществления; выявление стадийности, скачков, смен состояний в функционировании; в системах с управлением — выделение основных управляющих факторов. Здесь исследуется динамика важнейших изменений в системе, ход событий, вводятся параметры состояния, рассматриваются факторы, влияющие на эти параметры, обеспечивающие течение процессов, а также условия начала и конца процессов. Определяется, управляемы ли процессы и способствуют ли они осуществлению системой своих главных функций. Для управляемых систем уясняются основные управляющие воздействия, их тип, источник и степень влияния на систему.

Стадия 4. Выявление основных элементов «несистемы», с которыми связана изучаемая система. Выявление характера этих связей. На этой стадии решается ряд отдельных проблем. Исследуются основные внешние воздействия на систему (входы). Определяются их тип (вещественные, энергетические, информационные), степень влияния на систему, основные характеристики. Фиксируются границы того, что считается системой, определяются элементы «несистемы», на которые направлены основные выходные воздействия. Здесь же полезно проследить эволюцию системы, путь её формирования. Нередко именно это ведет к пониманию структуры и особенностей функционирования системы. В целом данная стадия позволяет лучше уяснить главные функции системы, её зависимость и уязвимость или относительную независимость во внешней среде.

Стадия 5. Выявление неопределенностей и случайностей в ситуации их определяющего влияния на систему (для стохастических систем).

Стадия 6. Выявление разветвленной структуры, иерархии, формирование представлений о системе как о совокупности модулей, связанных входами-выходами. Стадией 6 заканчивается формирование общих представлений о системе. Как правило, этого достаточно, если речь идет об объекте, с которым мы непосредственно работать не будем. Если же речь идет о системе, которой надо заниматься для её глубокого изучения, улучшения, управле-

ния, то нам придется пойти дальше по спиралеобразному пути углубленного исследования системы.

Стадия 7. Выявление всех элементов и связей, важных для целей рассмотрения. Их отнесение к структуре иерархии в системе. Ранжирование элементов и связей по их значимости.

Стадии 6 и 7 тесно связаны друг с другом, поэтому их обсуждение полезно провести вместе. Стадия 6 — это предел познания «внутри» достаточно сложной системы для лица, оперирующего ею целиком. Более углубленные знания о системе (стадия 7) будет иметь уже только специалист, отвечающий за её отдельные части. Для не слишком сложного объекта уровень стадии 7 — знание системы целиком — достижим и для одного человека. Таким образом, хотя суть стадий 6 и 7 одна и та же, но в первой из них мы ограничиваемся тем разумным объемом сведений, который доступен одному исследователю.

При углубленной детализации важно выделять именно существенные для рассмотрения элементы (модули) и связи, отбрасывая все то, что не представляет интереса для целей исследования. Познание системы предполагает не всегда только отделение существенного от несущественного, но также акцентирование внимания на более существенном. Детализация должна затронуть и уже рассмотренную в стадии 4 связь системы с «несистемой». На стадии 7 совокупность внешних связей считается проясненной настолько, что можно говорить о доскональном знании системы.

Стадии 6 и 7 подводят итог общему, цельному изучению системы. Дальнейшие стадии уже рассматривают только её отдельные стороны. Поэтому важно еще раз обратить внимание на системообразующие факторы, на роль каждого элемента и каждой связи, на понимание, почему они именно таковы или должны быть именно таковыми в аспекте единства системы.

Стадия 8. Учет изменений и неопределенностей в системе. Здесь исследуются медленное, обычно нежелательное изменение свойств системы, которое принято называть «старением», а также возможность замены отдельных частей (модулей) на новые, позволяющие не только противостоять старению, но и повысить качество системы по сравнению с первоначальным состоянием. Такое совершенствование искусственной системы принято называть развитием. К нему также относят улучшение характеристик модулей, подключение новых модулей, накопление информации для лучшего её использования, а иногда и перестройку структуры, иерархии связей.

Основные неопределенности в стохастической системе считаются исследованными на стадии 5. Однако недетерминированность всегда присутствует и в системе, не предназначенной работать в условиях случайного характера входов и связей. Добавим, что учет неопределенностей в этом случае обычно превращается в исследование чувствительности важнейших свойств (выхо-

дов) системы. Под чувствительностью понимают степень влияния изменения входов на изменение выходов.

Стадия 9. Исследование функций и процессов в системе в целях управления ими. Введение управления и процедур принятия решения. Управляющие воздействия как системы управления. Для целенаправленных и других систем с управлением данная стадия имеет большое значение. Основные управляющие факторы были уяснены при рассмотрении стадии 3, но там это носило характер общей информации о системе. Для эффективного введения управлений или изучения их воздействий на функции системы и процессы в ней необходимо глубокое знание системы. Именно поэтому мы говорим об анализе управлений только сейчас, после всестороннего рассмотрения системы. Напомним, что управление может быть чрезвычайно разнообразным по содержанию — от команд специализированной управляющей ЭВМ до министерских приказов.

Однако возможность единообразного рассмотрения всех целенаправленных вмешательств в поведение системы позволяет говорить уже не об отдельных управленческих актах, а о системе управления, которая тесно переплетается с основной системой, но четко выделяется в функциональном отношении.

На данной стадии выясняется, где, когда и как (в каких точках системы, в какие моменты, в каких процессах, скачках, выборах из совокупности, логических переходах и т.д.) система управления воздействует на основную систему, насколько это эффективно, приемлемо и удобно реализуемо. При введении управлений в систему должны быть исследованы варианты перевода входов и постоянных параметров в управляемые, определены допустимые пределы управления и способы их реализации.

После завершения стадий 6-9 исследование систем продолжается на качественно новом уровне — следует специфическая стадия моделирования. О создании модели можно говорить только после полного изучения системы.

Глава 3

Кибернетические модели

3.1 Формирование и роль кибернетического подхода в научном познании

Эволюция представления об управлении происходила в форме накопления, суммирования отдельных данных. Основатель науки об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в технических, биологических и социальных системах — американский математик Н. Винер (1894-1964), выпустивший в 1948 году книгу «Кибернетика, или управление их связь в животном и машине». Своё название новая наука получила от древнегреческого слова «кибернетес», что в переводе означает «управляющий», «рулевой», «кормчий».

Со сложными системами управления человек имел дело задолго до появления кибернетики (управление людьми, машинами; наблюдал регуляторные процессы у живых организмов и т.д.). В «докибернетический» период знания об управлении и организации носили «локальный» характер, т.е. в отдельных областях. Так, еще в 1843 г. польский мыслитель Б. Трентовский опубликовал малоизвестную в настоящее время книгу «Отношении философии к кибернетике как искусству управления народом». В своей книге «Опыт философских наук» в 1834 году известный физик Ампер дал классификацию наук, среди которых третьей по счету стоит кибернетика — наука о текущей политике и практическом управлении государством (обществом).

Кибернетика становится важнейшим фактором научно-технической революции на высших этапах её развития. Кибернетика возникла на стыке многих областей знания математики, логики, семиотики, биологии и социологии. Обобщающий характер кибернетических идей и методов сближает науку об управлении, каковой является кибернетика, с философией. Задача обоснования исходных понятий кибернетики, особенно таких, как информация, управ-

ление, обратная связь и др. требуют выхода в более широкую, философскую область знаний, где рассматриваются атрибуты материи — общие свойства движения, закономерности познания. Сама кибернетика как наука об управлении многое дает современному философскому мышлению. Она позволяет более глубоко раскрыть механизм самоорганизации материи, обогащает содержание категории связей, причинности, позволяет более детально изучить диалектику необходимости и случайности, возможности и действительности. Открываются пути для разработки «кибернетической» гносеологии, которая не подменяет диалектический материализм теорией познания, но позволяет уточнить, детализировать и углубить в свете науки об управлении ряд существенно важных проблем.

Кибернетика рассматривает проблемы управления, вводя в науку новый понятийный, категориальный аппарат. В общую кибернетику обычно включают теорию информации, теорию алгоритмов, теорию игр и теорию автоматов, техническую кибернетику.

К основным задачам кибернетики относятся:

1. установление фактов, общих для управляемых систем или для некоторых их совокупностей;
2. выявление ограничений, свойственных управляемым системам и установление их происхождения;
3. нахождение общих законов, которым подчиняются управляемые системы;
4. определение путей практического использования установленных фактов и найденных закономерностей.

3.2 Информация как количественная характеристика организации и формы деятельности системы

В отечественной и зарубежной литературе предлагается много разных концепций (определений) информации:

1. информация как отраженное разнообразие,
2. информация как устранение неопределенности (энтропии),
3. информация как связь между управляющей и управляемой системами,

4. информация как преобразование сообщений,
5. информация как единство содержания и формы (например, мысль — содержание, а само слово, звук — форма),
6. информация — это мера упорядоченности, организации системы в её связях с окружающей средой.

Информация, как форма деятельности, характерна самоорганизующимся системам, способным к целесообразному управлению. Под информацией (от лат. разъяснение, изложение) понимают любые сведения, передаваемые с помощью каких — либо сигналов или знаков от одного объекта к другому объекту. Понятие информации содержит множество аспектов: семантический, аксиологический, коммуникативный, гносеологический, теоретико-содержательный, физический и т.д.

К свойствам информации относят, во-первых, способность управлять физическими, химическими, биологическими и социальными процессами. Там, где есть информация, действует управление, а там, где осуществляется управление, непременно наличествует и информация. Второе свойство информации — способность передаваться на расстоянии (при перемещении инфоносителя). Третье — способность информации подвергаться переработке. Четвертое — способность сохраняться в течение любых промежутков времени и изменяться во времени. Пятое свойство — способность переходить из пассивной формы в активную. Например, когда извлекается из «памяти» для построения тех или иных структур (синтез белка, создание текста на компьютере и т.д.).

По Н. Винеру информация — это обозначение содержания (сигналов), полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств. Информация носит объективный характер, не является субъективным феноменом, связанным со свойствами психики. Являясь сигналом к действию, она не обязательно должна проходить через сознание. Часть информации, на основе которой происходит регулирование деятельности внутренних органов, а также разнообразие приспособительного поведения живых организмов вплоть до самых примитивных форм, передается на бессознательном уровне. Любая информация является отражением событий окружающей среды, но не всякое отражение представляет собой информацию. Эффект информационных процессов во многом определяется внутренним состоянием системы. Физическим носителем сигналов могут быть всевозможные виды энергии и вещества. Знаковая сущность сигнала позволяет ему, с одной стороны, отражать событие, о котором он несет информацию, а с другой стороны, приобрести относительную независимость

от информационного источника. Информационное значение сигнала не зависит от его энергии. Сигналы могут иметь самую разную физическую природу, но чтобы быть носителями информации, они должны удовлетворять требованиям изоморфизма. Под изоморфизмом понимается взаимное соответствие физически разнородных явлений, позволяющее сохранять содержание передаваемого сообщения, несмотря на чередование его носителей.

Символы языка кодирования отличаются друг от друга параметрами общего физического носителя, которые достигаются его модуляцией. Так как наиболее распространенным носителем сигналов в технике являются послышки электрического тока, то его модуляция осуществляется путем изменения таких параметров, как сила, длительность, частота и порядок следования, фазные отношения, форма посылки и т. д. Число символов, из которых составляется сообщение, определяет значность кода. Если все сообщения имеют одинаковое число букв, то такой код называется равномерным (телеграфный пятизначный код Бодо, генетический код), а если разное число знаков, то неравномерным (код Морзе). Для равномерного кода можно вычислить количество разных сообщений, которое он может отобразить как $N = m^n$, где m — число символов кода, n — значность кода. Например, при передаче текста телеграфным пятизначным кодом Бодо при двухзнаковом коде (импульс тока и его отсутствие) $N = 2^5 = 32$, что достаточно для построения любого текста. Равномерный код имеет преимущество в различении сообщений как групп сигналов, кратных значности кода, в то время как в случае неравномерного кода необходимы дополнительные сигналы, разделяющие сообщения, выраженные разным числом знаков.

Одной из общих характеристик является экономичность кода, определяемая в основном временем передачи данного объема сообщения. Код тем более экономичен, чем меньше сигналов он использует для передачи сообщения, т. е. чем меньше его значность. Наиболее экономичный двоичный код, состоящий из двух знаков. Однако при оценке экономичности необходимо учитывать устойчивость кода к шуму, создающему помехи в процессе передачи информации. Для повышения устойчивости к помехам пользуются специальными кодами, которые могут их корректировать. Корректирующие коды способны обнаруживать с заданной точностью и исправлять ошибки, возникающие при передаче сообщений. В основе всех корректирующих кодов лежит избыточность используемых сигналов или посылаемых сообщений. Например, в генетическом коде используются 3-значные кодоны ($n = 3$) на основе 4-символьного алфавита ($n = 4$), образованного следующими нуклеотидами: аденин, гуанин, урацил, цитозин. Каждый кодон кодирует одну аминокислоту, входящую в состав белка. Число выборов в этом случае составляет $N^n = 4^3 = 64$. Явная избыточность генетического кода обеспечива-

ет его высокую помехоустойчивость к мутациям. Участок ДНК, содержащий в виде последовательности нуклеотидов, информацию об одном белке-гене может быть представлен разным набором кодонов, образуя аллели. Наличие в популяциях нескольких аллелей каждого гена приводит к полиморфизму и комбинативной изменчивости при половом размножении, т. е. служит исходным материалом для эволюции. Согласно закону Моргана-Эфрусси, расчлененность наследственного основания на гены, соединенные в хромосомы, а генов на нуклеотидные триплеты, молекулярно-дискретная организация и качественная определенность белков организма как конечных носителей информации, обусловленность нервной деятельности отдельными рефлексами — все это выражает дискретность (прерывность) биологической информации. Внутреннее единство, целостность биологической информации любого организма, несводимость этой информации к простой сумме её элементарных единиц выражают свойство её непрерывности. В экспрессии (реализации) биологической информации её дискретность и непрерывность проявляются одновременно, обуславливая единый процесс информационной детерминации (определения) развития и функционирования организма. Отдельные стороны этого процесса составляют генная, геномная и надгеномная (эпигенетическая) детерминации. Любой признак организма при учете его полной причинно-следственной обусловленности определяется взаимодействием всех этих детерминаций, в чем и проявляется единство дискретности и непрерывности биологической информации.

Сообщение, закодированное какими-либо символами, содержит в себе неопределенность, пропорциональную числу возможных сочетаний из этого набора символов по их позициям, то есть может быть охарактеризована некоторым статистическим весом сообщения. Связь информации с неопределенностью системы может быть выражена формулой Хартли: $I = \log_2 N$, где I — информационная емкость системы (максимально возможное значение), N — неопределенность, обратно пропорциональна вероятности состояния системы. При основании логарифма равному 2, информация будет исчисляться в битах (от англ. — двоичная единица). Вероятность представляет собой меру возможности наступления случайного события. Из данного выражения следует, что чем меньше вероятность конкретного состояния системы, тем больше информации принесет событие, реализующее это состояние. Для случаев, когда состояния системы неравновероятны, оценку организованности системы проводят через среднее значение информации всех возможных состояний по формуле К. Шеннона:

$$H = -k * \sum_{i=1}^n p_i * \log p_i$$

где H — информационная энтропия, p_i — вероятность i -го состояния из k возможных, k — постоянная, определяющая единицу измерения. Таким образом, можно сделать вывод, что появление неоднородности в равномерном пространственном распределении материи повышает её организацию, а значит создает структуру. Поэтому для равновероятных состояний системы величина информационной энтропии всегда максимальна, а снижение её величины за счет введения ограничений на равновероятность состояний упорядочивает систему.

Отметим, что формулы позволяют определить лишь количество передаваемой информации, но не её ценность. Два сообщения, содержащие одинаковое число бит информации, могут иметь совершенно разную значимость. Для количественной оценки повышения уровня организации (R) при перестройке состояний от равновероятности к неравновероятности используют выражение У. Эшби: $R = 1 - H/H_{max}$, где H — информационная энтропия для неравновероятных состояний; H_{max} — информационная энтропия для равновероятных состояний. Информационная энтропия, по аналогии с термодинамической, выражает вероятность получения сигнала из некоторого их множества. Согласно Эшби, по уровню организации можно выделить системы низкоорганизованные вероятностные или стохастические ($R < 0,1$), среднеорганизованные или вероятностно-детерминированные ($0,1 \leq R \leq 0,3$), высокоорганизованные — детерминированные ($0,3 \leq R \leq 1$). Данные формулы позволяют определять степень упорядоченности системы, исследовать изменение этой упорядоченности во времени, сравнивать степень упорядоченности различных систем.

3.3 Общие закономерности процессов управления и передачи информации в динамических системах

Динамическими или динамичными называют системы, состояние которых заметно меняется со временем. Четкой границы между статическими и динамическими системами провести нельзя, все зависит от условий рассмотрения и временного масштаба. Среди динамических систем выделяют детерминированные и вероятностные. Для детерминированных систем их будущие состояния могут быть точно предсказаны, выделены из предыдущих состояний. Примеры: затмения (взаиморасположения Земли, Луны и Солнца), смена времен года и т.д. Для вероятностных (стохастических) предсказание будущих состояний невозможно. Примеры: броуновское движение, все биологические

системы и т. д.

Как было отмечено ранее, одним из важнейших свойств информации является способность управлять процессами.

Для систем любой природы понятие «управление» можно определить следующим образом: управление — это воздействие на объект, выбранное на основании имеющейся для этого информации из множества возможных воздействий, улучшающее его функционирование или развитие. У управляемых систем всегда существует некоторое множество возможных изменений, из которого производится выбор предпочтительного изменения. Если у системы нет выбора, то не может быть и речи об управлении.

Управление — это вызов изменений в системе или перевод системы из одного состояния в другое в соответствии с объективно существующей или выбранной целью. Управлять — это и предвидеть те изменения, которые произойдут в системе после подачи управляющего воздействия (сигнала, несущего информацию). Всякая система управления рассматривается как единство управляющей системы (субъекта управления) и управляемой системы — объекта управления. Управление системой или объектом всегда происходит в какой-то внешней среде. Поведение любой управляемой системы всегда изучается с учетом её связей с окружающей средой. Поскольку все объекты, явления и процессы взаимосвязаны и влияют друг на друга, то, выделяя какой-либо объект, необходимо учитывать влияние среды на этот объект и наоборот.

Функции и задачи управления:

1. Организация системы — полное, качественное выделение подсистем, описание их взаимодействий и структуры системы (как линейной, так и иерархической, сетевой или матричной).
2. Прогнозирование поведения системы т.е. исследование будущего системы.
3. Планирование (координация во времени, в пространстве, по информации) ресурсов и элементов, подсистем и структуры системы, необходимых (достаточных, — в случае оптимального планирования) для достижения цели системы.
4. Учет и контроль ресурсов, приводящих к тем или иным желаемым состояниям системы.
5. Регулирование — адаптация и приспособление системы к изменениям внешней среды.

6. Реализация тех или иных спланированных состояний, решений.

Свойством управляемости может обладать не любая система. Необходимым условием наличия в системе хотя бы потенциальных возможностей управления является её организованность. Чтобы управление могло функционировать, то есть целенаправленно изменять объект, оно должно содержать четыре необходимых элемента:

1. Каналы сбора информации о состоянии среды и объекта.
2. Канал воздействия на объект.
3. Цель управления.
4. Способ (алгоритм, правило) управления, указывающий, каким образом можно достичь поставленной цели, располагая информацией о состоянии среды и объекта.

3.3.1 Чёрный ящик

Поведение системы определяется следующими тремя факторами:

1. характеристиками составляющих её элементов и подсистем;
2. структурой взаимодействия отдельных элементов, в которой обычно используются обратные связи;
3. свойствами входных сигналов, или переменных. (Первоначально мы будем предполагать, что эти переменные являются независимыми и могут выбираться по усмотрению исследователя, хотя возможно, что некоторые из них и определяются на самом деле выходными сигналами каких-то других систем.)

Результатом преобразования входных сигналов в системе служат её выходные сигналы. Выходным сигналом можно считать любую переменную, характеризующую систему, при условии, что её поведение представляет интерес для исследователя. Отметим при этом, что вход или выход системы совсем не обязательно должен быть вещественным. Напряжение, температура или давление в этом смысле ничуть не хуже числа литров крови в секунду, характеризующего скорость кровотока.

Из всего сказанного выше следует, что любую систему можно изобразить символически как устройство с входом и выходом. При этом в качестве стандартного символа используется прямоугольник с входящими и исходящими

стрелками, соответствующими интересующим нас переменным. Такая система носит название чёрного ящика. Любую систему можно также при желании представить в виде совокупности более мелких взаимосвязанных подсистем.

Чёрный ящик — термин, используемый в точных науках (в частности, системотехнике, кибернетике и физике) для обозначения системы, механизм работы которой очень сложен, неизвестен или неважен в рамках данной задачи. Такие системы обычно имеют некий «вход» для ввода информации и «выход» для отображения результатов работы. Состояние выходов обычно функционально зависит от состояния входов.

Для простого закономерного (например, физического или химического) процесса можно по большей части найти двухзвенную формулу перехода от причины к следствию, полностью описывающую характер зависимости второго от первой. Несколько расширяя границы терминов, введенных кибернетикой, можно трактовать в таком процессе причину как его вход, следствие — как выход, формулу, описывающую явление, — как его передаточную функцию.

В жизненных физиологических процессах такая простейшая двучленная цепь обусловленности встречается чрезвычайно редко (и то, может быть, только кажущимся образом); как правило, цепь причинно-следственных зависимостей между входом (внешним воздействием, раздражением, сигналом) и выходом (ответом, реакцией) содержит неизвестное нам число скрытых промежуточных звеньев при столь же малоизвестной внутренней структурной схеме цепи. Этот бесспорный факт и привел к широко применяемому в кибернетике понятию «черного ящика» — системы, в которой для наблюдения и констатации доступны лишь первое и последнее звенья причинной цепи — явления на её входе и выходе. У физиологов, увлечённых кибернетикой, естественным образом сформировалась идея о возможности «рассекретить» черные ящики систем организма косвенным путем, а именно при помощи моделирования.

Их рассуждения шли примерно следующим путем: определяя посредством измерений передаточную функцию изучаемой системы между её входом и выходом, можно сделать гипотетическое заключение о том, какая именно внутренняя блок-схема и какие свойства её элементов и связей могли бы воспроизводить точно такую передаточную функцию. Затем эту схему можно преобразовать в уравнение и либо положить его в основу программы, вычислительной машины, либо построить удовлетворяющий ему вещественный аналог. Чем лучше имитируется этой программой или аналогом передаточная функция живого прототипа, чем точнее удастся установить её параметры, тем крепче становится вера в то, что непроницаемые для взора стенки «черного ящика» удалось успешно просветить.

Существует два подхода при использовании понятия чёрный ящик — «механизм работы не важен» и «механизм работы известен».

Если механизм работы не важен, то зависимость результатов от входных данных, как правило, известна; концепция чёрного ящика при этом используется, чтобы не отвлекаться на внутреннее устройство. Однако такой подход может дать ошибку при использовании устройства на пределе его возможностей. Типичным примером может служить принцип, применяемый для ремонта радиоэлектронной аппаратуры. В качестве «чёрного ящика» рассматривается, например, микросхема. Ремонтнику нет дела, что там, внутри микросхемы. Он замеряет входные и выходные сигналы на ножках микросхемы, и сравнивает их с теми, что представлены в технической документации. В случае совпадения замеренных данных и предложенных микросхема признается исправной. В противном случае (несовпадения или отсутствия хотя бы одного сигнала) микросхема признается неисправной и меняется. Такой подход позволяет доверять ремонт малоквалифицированному персоналу, сокращает время и стоимость ремонта.

В случае если механизм работы известен, суть исследования сводится к отождествлению работы системы с одним из механизмов функционирования:

1. Фильтр

Цель: обеспечить пропуск в систему сигналов с заданными параметрами.

Свойства: способность определять параметры поступающих на вход системы сигналов и определять степень их соответствия заданным параметрам; закрывать доступ в систему сигналам, параметры которых не соответствуют заданным.

Функции: допуск в систему только сигналов с заданными параметрами.

2. Сепаратор

Цель: выделить индивидуальные, присущие только данному сигналу свойства.

Свойства: способность отделять несущественные признаки, свойства, от существенных присущих только данному сигналу.

Функции: определение индивидуальных признаков свойств сигналом и классификация сигналов по однородным признакам и свойствам.

3. Дифференциал

Цель: разделение сигналов по признакам и распределение их в системе в соответствии с её потребностями.

Свойства: способность разделять сигналы по свойствам и распределять их в системе в соответствии с заданной программой.

Функции: разделение и распределение сигналов в системе.

4. Трансформатор

Цель: преобразование сигналов и их свойств в соответствии с заданной программой.

Свойства: способность изменять имеющиеся свойства поступивших сигналов в заданные свойства.

Функции: изменение свойств, качественных и количественных параметров сигналов в свойства с заданными количественными и качественными параметрами.

5. Трансмиссия

Цель: перемещение сигналов из точки А, в заданную точку Б, то есть от одного механизма к другому.

Свойства: способность перемещать сигналы во времени и пространстве.

Функции: перемещение сигналов с заданными параметрами, в заданное место системы. Перемещение может осуществляться по горизонталям, по вертикалям и диагоналям. Перемещение может осуществляться как вперед, так и назад (реверсивно).

Несколько лет назад увлечение описанной методикой моделирования и построения аналогов вошло в моду. Не было, кажется, такой страны и такого университета, где бы в этот период не сооружались электрические черепахи и магнитные мыши всех видов и разновидностей. Но если 4-5 лет назад было существенно необходимо указывать на низкую научную ценность подобных модельных игрушек, то сейчас это сделала за нас сама жизнь: по-видимому, что-то было понято, так как интерес к аналогам этого рода явно пошел на убыль. Однако, хотя бы для того, чтобы не могли повториться старые ошибки, необходимо провести краткий анализ плюсов и минусов принципа «черного ящика».

Моделирование путем подгонки передаточной функции всей цепи, скрытой в черном ящике, неявно опирается на уверенность в однозначности этой

функции. Иными словами, явно или неосознанно постулируется, что каждой данной передаточной функции соответствует один-единственный внутренний механизм, способный её осуществлять. Между тем если этот постулат однозначности справедлив для простых двучленных причинно-следственных цепочек, то для сложных цепей принципиально никогда нельзя исключить того, что может существовать и мыслиться целый ряд внутренних схем и структур самого разнородного характера, которые будут, однако, обладать совершенно неотличимыми характеристиками соотношений между входом и выходом. Тем более это справедливо для гипотез, не вышедших еще за рамки качественного описания; здесь ярким примером могут служить многочисленные устройства, в которых физиологические явления условного замыкания и памяти моделируются весьма поверхностно при помощи электрических емкостей, шунтированных утечкой.

Значит ли это, однако, что метод «черного ящика» вообще скомпрометирован и что от него следует нацело отказаться в экспериментальной физиологии?

Конечно, это не так, и сами по себе схематизация и упрощение, неизбежно вносимые при всяком моделировании, присущи любому процессу изыскания объективных закономерностей окружающего мира настолько неотъемлемо, что к ним следует относиться как к обязательным этапам постепенного уточнения и углубления наших знаний. Метод последовательных приближений заложен в самом фундаменте естествознания, а путь создания рабочих гипотез с их проверкой по косвенным данным самым тесным образом связан с ним.

Осложнение, вносимое методом «черного ящика», состоит не в том или ином упрощении, а в том, что он может предъявить исследователю целый ряд равновозможных, грубо приближенных формул, число которых тем больше, чем сильнее упрощена исходная концепция. Ошибка многих авторов состояла именно в том, что они некритично избирали из этого ряда первый попавшийся им вариант, не имея (и часто не доискиваясь) никакой гарантии в том, что этот вариант действительно совпадает в первом приближении со скрытым устройством прототипа. По-видимому, сейчас можно указать только один надежный принцип, опираясь на который можно будет извлечь действительную экспериментальную пользу из моделирования по принципу черного ящика.

Прежде всего, разумеется, если модель, основанная на той или иной гипотезе о внутренней структуре прототипа, откажется работать так, как этот последний, то исследователь в полной мере обогащается, отрицательным опытом. Можно с уверенностью сказать, что моделирование дает очень четкий и надежный критерий непригодности для апробируемой рабочей гипотезы, т.е. страхует ученого от углубления в неправильный, тупиковый путь. Какой

бы импонирующей на первый взгляд ни была качественная гипотеза, от неё ничего не останется, если она не сможет выдержать экзамена количественной проверки на модели.

Если, наоборот, модельное уподобление увенчалось успехом, то, как уже сказано, исследователь еще не вправе на этом основании признать свою рабочую гипотезу оправданной. И единственный путь к постепенному повышению уверенности в пригодности первоначально подтвердившейся гипотезы состоит, по-видимому, в следующем.

Как уже отмечено, данная конкретная кривая передаточной функции может одинаково хорошо описывать существенно разные структурные схемы. Однако можно поставить опыт шире и, систематически изменяя условия протекания исследуемого процесса, формы стимуляции, сопряжения данного процесса с другими и т. п., получить целое семейство или континуум таких передаточных кривых, описывающих данный натуральный объект. Если при этом окажется, что между моделью и объектам имеется бесспорное соответствие по всему семейству вариантов, то такой результат существенно повысит степень доверия, заслуживаемого моделью. По законам теории вероятностей вероятность того, что совпадение пары одиночных кривых было случайным, непринципиальным значительно больше, чем такая же вероятность случайного попарного совпадения всех кривых, принадлежащих двум сравниваемым семействам или множествам. Чем шире тот диапазон вариаций или планомерных изменений опыта, на протяжении которого модель послушно следует за прототипом, тем вероятнее, что соответствие не случайно. Либо подобие модели живому прототипу оборвется на том или другом этапе всестороннего «обыгрывания» первой, либо путем постепенной корректировки и «доводки» её удастся повысить из ранга предварительных рабочих гипотез в ранг фактического закона явления.

Научные перспективы, открытые перед моделированием биологических и, в частности, физиологических закономерностей, в настоящее время очень широки и многообещающи. В то же время очевидно, что сделанное представляет собой только первые несмелые шаги, и в ближайшем будущем мы, несомненно, окажемся свидетелями интенсивного роста и развития исследовательских работ по линии моделирования биологических функций.

3.3.2 Модель системы управления

Основными элементами структуры системы управления являются объект, блок сравнения, компенсатор, исполнительное устройство, датчики сигналов. При изучении системы управления естественно начать с объекта управления. В объекте (зрачок, динамика корабля, каталитический крекинг) происходит

основной процесс переработки некоторых материальных или информационных входных величин в требуемые выходные величины при наличии возмущающих воздействий и изменения параметров, что достигается за счет правильного управления этим процессом. Зачастую этот процесс может сопровождаться управляемым использованием значительных количеств энергии. Инерционный характер процесса обычно приводит к необходимости использования дифференциальных уравнений для его описания, и часто конструктор системы должен предусмотреть где-то в контуре опережающее звено, которое обеспечит «антиинерционность». Даже в таких довольно редких случаях, когда объект управления не обладает инерционностью, такие звенья так или иначе оказываются включенными в контур (например, в системе управления зрачком опережающее звено находится в сфинктере).

Блок сравнения в технических системах присутствует в явном виде как устройство, позволяющее вычитать одно напряжение из другого, одно давление из другого и т. д. Функция сравнения непосредственно реализуется и в некоторых биологических системах, например в следящих системах, образуемых глазами и центральной нервной системой и позволяющих зрительно следить за целью и манипулировать руками.

Однако в большинстве биологических систем регулирования, вероятнее всего, нет блока сравнения как самостоятельного функционального элемента. Устойчивость режимов некоторых контуров объясняется тем, что некоторые из компонент контура реализуют попутно и функции, эквивалентные функциям блока сравнения и контура отрицательной обратной связи.

В традиционной системе управления для коррекции поведения системы используется сигнал ошибки. На практике в контурах обратной связи могут использоваться и другие сигналы, например скорость поворота корабля и его ускорение, но эти уточнения не влияют значительным образом на принцип использования сигнала ошибки в исполнительном устройстве. Сигнал ошибки поступает в блок компенсации, или регулятор, который обычно конструируется, так, чтобы «подстегнуть» этот сигнал и таким образом уменьшить запаздывание системы, а также погасить статические ошибки. Все эти операции формирования сигнала обычно осуществляются на низком уровне мощности в цепях, которые могут быть электрическими, механическими, гидравлическими и т. п. Однако в биологических системах чаще всего невозможна такая свобода в выборе элементов, и поэтому в них этот блок зачастую отсутствует. Улучшение динамических характеристик биологических систем по большей части осуществляется в датчиках сигнала обратной

Аналогичная картина сплошь и рядом наблюдается и в технических системах, где зачастую у регулятора два входа: для задающего сигнала и для сигнала обратной связи, а не один общий для сигнала ошибки связи, а также

в процессе образования сигнала ошибки. Примером подобной ситуации может служить сетчатка. В дальнейшем мы приведем еще и другие примеры.

Исполнительное устройство нужно для того, чтобы обеспечить управляющее воздействие, подаваемое на объект управления. В подавляющем большинстве случаев здесь предполагается усиление уровня мощности и часто преобразование одного типа энергии в другой. Обычно на этом этапе уже нет никакой необходимости в коррекции динамики системы, а на практике динамика системы часто даже ухудшается из-за высокого уровня мощности этого элемента.

В технических системах одно и то же исполнительное устройство может обеспечивать как положительные, так и отрицательные управляющие воздействия (например, положительное или отрицательное напряжение на выходе усилителя, сила тяги авиационных двигателей и т. п.). Однако из этого правила бывают исключения; например, для получения двигательной тяги используется двигатель автомобиля, а для создания силы, действующей в обратном направлении, — тормоз. В типичных биологических системах управления для получения двустороннего действия исполнительные устройства обычно используются попарно. Хорошо известным примером такой ситуации может служить пара мышц-антагонистов, а также процессы потоотделения и мышечной дрожи. В системе управления зрачком, по-видимому, нужен только один исполнительный механизм, поскольку в нормальном режиме работы напряжение радиальной мышцы отлично от нуля, однако в этом случае природа предусматривает пару мышц-антагонистов.

Датчик сигналов обратной связи, очевидно, является очень важным звеном замкнутого контура. В технических системах это почти всегда отдельный функциональный блок (например, потенциометр). Во многих биологических системах датчиком служит также отдельный чувствительный орган; в качестве примера можно указать на рецепторы боли или давления и на мышечные проприоцепторы. Однако в других случаях «измеряемая» величина может вызывать изменение параметров в уже существующих органах. Так, например, осуществляется «измерение» температуры гипоталамусом. Наконец, возможны такие случаи, когда «измерение» производит некоторый орган, основная функция которого состоит совсем в другом. Так, в системе регуляции величины зрачка сетчатка измеряет полный поток, что безусловно является её второстепенной функцией.

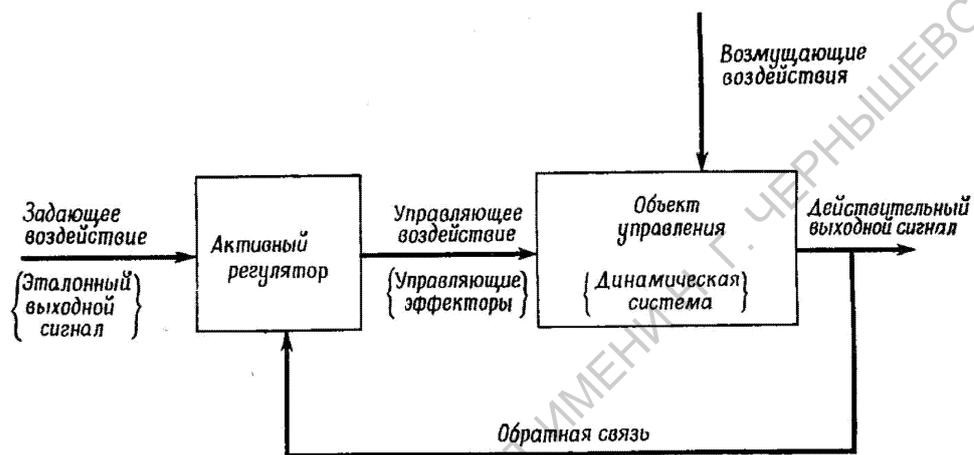
В плохо сконструированных системах такие датчики могут быть слишком инерционными. Классическим примером может служить медицинский ртутный термометр, тогда как термопары и другие легко доступные устройства позволяют измерять температуру практически мгновенно. В то же время природа, по-видимому, создает датчики сигналов обратной связи, которые «под-

стегивают» информацию о реакции на управляющее воздействие, учитывая информацию о производной. В этом случае эти устройства в значительной степени дублируют функции компенсаторов, или регуляторов, в технических системах, о чем уже вкратце упоминалось выше.

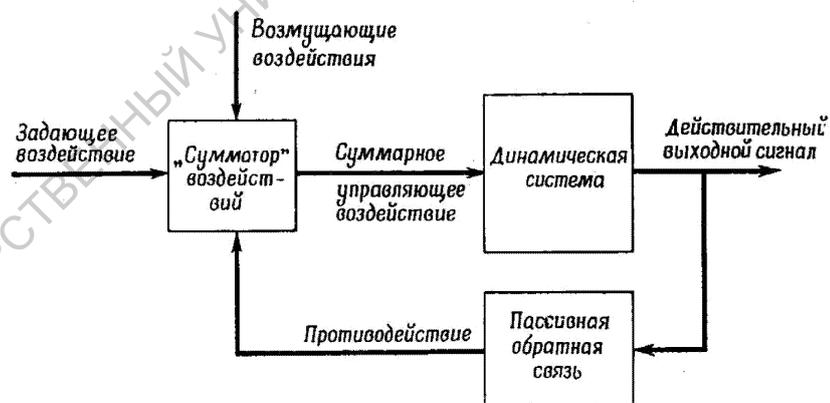
Датчики сигналов обратной связи часто выполняют к тому же и роль преобразователей, т. е. преобразуют энергию из одной её формы в другую, а уровень мощности их выходных сигналов обычно низок. С методологической точки зрения полезно определить энергетический характер различных типов элементов системы.

Очень часто понятие система управления используется как синоним понятия система управления с отрицательной обратной связью. Простейшим представителем этого класса систем может служить активная система управления, схема которой показана на рис. 3.1 А.

Основным входным сигналом для этой системы является задающее воздействие, которое заставляет её вести себя требуемым образом; поэтому иногда мы будем называть его желаемым (эталонным) выходным сигналом. Действительный выходной сигнал динамической системы, которой мы управляем (объекта управления), передается по каналу обратной связи в активный регулятор для сравнения с желаемым выходным сигналом. Если между этими двумя сигналами имеется расхождение, или ошибка, то на выходе регулятора формируется управляющее воздействие, действующее на объект управления таким образом, чтобы приблизить его выходной сигнал к желаемому, что в свою очередь приводит к уменьшению ошибки. Мы говорим, что в такой системе имеется отрицательная обратная связь, так как здесь выходной сигнал вычитается из входного; исследования показывают, что потенциальная управляемость ситуации всегда возрастает, как только появляется возможность сравнивать текущее поведение системы с тем, что от неё требуется. В частности, такая замкнутая схема управления позволяет активно противоборствовать неизбежным возмущающим воздействиям внешней среды. Именно эта возможность компенсации вредных воздействий и объясняет в основном, почему в живых организмах большинство регуляторных систем (например, система терморегуляции, которая должна компенсировать изменения скорости теплоотдачи) построено по замкнутой схеме. Другая важнейшая причина использования замкнутых систем управления состоит в том, что такие системы могут поддерживать желаемый характер выходного сигнала даже в тех случаях, когда меняются параметры объекта управления. В технических системах сравнение входного сигнала с выходным обычно предполагает прямое вычитание одной из этих величин из другой, в результате чего непосредственно вычисляется сигнал ошибки. В биологических системах вместо такого прямого вычитания зачастую производится то или иное изменение параметров



А



Б

Рис. 3.1: Активная (А) и пассивная (Б) системы управления с обратной связью.

объекта управления.

Вообще говоря, оба показанных на рис. 3.1 блока в свою очередь могут быть разбиты на еще более мелкие подсистемы, но приведенная здесь схема является самой простой из всех тех, которые позволяют объяснить важнейшие черты активных систем с обратной связью. Мы называем такую систему активной потому, что в природе существуют и другие, внешне очень похожие системы управления, которые можно назвать пассивными. Действительно, во многих физических и физиологических системах любое изменение входного сигнала неизбежно приводит к возникновению противодействия, стремящегося сохранить имевшееся состояние равновесия.

Схематически этот процесс можно представить так, как это показано на рис. 3.1 Б, т. е. практически так же, как и на рис. 3.1 А, только разбив блок регулятора на две части. Но хотя схемы на рис. 3.1 А и 3.1 Б по внешнему виду практически одинаковы, на самом деле с точки зрения их конструирования и функционирования между ними есть существенное различие. В рабочем порядке мы можем условиться называть систему управления с обратной связью активной, если её контур обратной связи введен специально для решения задачи управления, и пассивной — в противных случаях. В этом смысле систему терморегуляции млекопитающих нужно считать активной, а у холоднокровных животных — пассивной, так как её функционирование целиком и полностью зависит от внешних условий.

3.3.3 Энергетическая классификация элементов системы управления

Как мы уже установили, в системах управления существенными факторами, определяющими зависимость между входом и выходом, являются потоки информации, а потоки энергии хотя и необходимы, но подчинены процессам информационного обмена и обычно не оказывают существенного влияния на динамику системы. Однако энергетические процессы происходят во всех элементах системы, и, исходя из характера этих процессов, можно построить весьма полезную, хотя и неоднозначную классификацию элементов.

Усилитель. Усилитель увеличивает уровень мощности сигнала, несущего полезную информацию. Примером биологического усилителя могут служить мышцы. Вообще же говоря, усилителями являются большинство исполнительных устройств систем управления. Усилители-преобразователи удовлетворяют, кроме того, и определению преобразователя, приведенному ниже.

Преобразователь. Этот элемент преобразует энергию из одной её формы в другую. Например, термopара преобразует тепловую энергию в электрическую. Усилители-преобразователи также преобразуют энергию из одной фор-

мы в другую, но, кроме того, они увеличивают её, используя дополнительный источник энергии. Так, органы обоняния насекомых обнаруживают присутствие всего нескольких молекул некоторых химических веществ, используя управляемый внутренний источник энергии, повышающий мощность афферентного нейронного сигнала.

Трансформатор. Трансформатор изменяет уровень сигнала, не изменяя ни его мощности, ни формы используемой энергии. Примерами могут служить рычаги, электрические трансформаторы, гидравлические и зубчатые передачи. В биологических системах рычаги широко используются при передаче мышечных усилий костям. Иногда при этом достигается определенный механический выигрыш в силе, но чаще справедливо обратное, и мышца должна развивать большее усилие, чем то, которое реально используется (примером могут служить челюстные мышцы).

Усиления мощности в трансформаторах не происходит, поскольку эти элементы являются пассивными. Фактически в них даже всегда наблюдаются небольшие потери энергии на трение. Но если пренебречь этими потерями, трансформаторы подчиняются закону сохранения энергии, так что для случая рычага. Это уравнение показывает, что если трансформатор дает выигрыш в силе, то это приводит к получению на выходе меньшего смещения.

Канал связи. По каналу связи сигналы передаются на некоторое расстояние, в идеале без искажений или изменения энергетического уровня. Элементом, который с высокой степенью точности реализует это определение, является нейрон. Однако при более тщательном изучении выясняется, что нейроны используют по мере передачи сигналов внешние управляемые источники энергии и потому одновременно являются усилителями. Гормональная передача через кровоток не сопровождается усилением; напротив, в этом процессе происходит даже определенное рассеивание энергии.

3.4 Принципы управления

Состояние любой биосистемы можно охарактеризовать одной или несколькими физическими величинами. Например, состояние генератора характеризуется величиной напряжения и значением частоты этого напряжения, двигателя — угловой частотой вращения его вала, закалочной печи — температурой, антенны радиолокационной станции — угловым положением, ракеты — координатами траектории полета.

Впредь технические устройства будем называть объектами, а физические величины, характеризующие их состояние, — выходными величинами объектов. На практике выходные величины объектов должны удовлетворять опре-

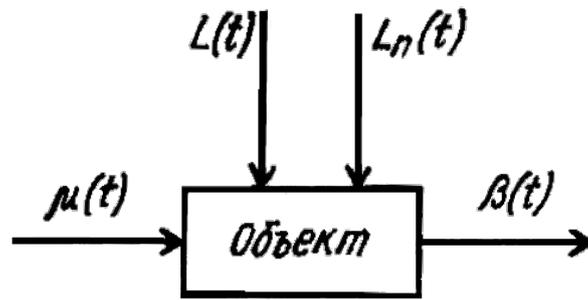


Рис. 3.2: Схема объекта и воздействий.

деленным требованиям. Совокупность предписаний, определяющих характер изменения выходных величин объектов, называется алгоритмом функционирования. К наиболее часто встречающимся на практике алгоритмам функционирования относятся следующие:

- поддержание постоянства выходной величины, равной заданному (требуемому) значению;
- изменение выходной величины по заданному закону (программе);
- изменение выходной величины по заранее неизвестному закону.

Например, обычно необходимо, чтобы напряжение генератора, частота этого напряжения, частота вращения ротора двигателя поддерживались постоянными, равными требуемым значениям. Траектория полета ракеты должна изменяться по определенной, заранее разработанной программе. Антенна радиолокационной станции должна изменять угловое положение таким образом, чтобы ось равносигнальной зоны была направлена на цель, координаты которой изменяются произвольно.

Для того чтобы выходная величина $\beta(t)$ объекта (рис. 3.2) приняла требуемое значение, на его вход подается входное воздействие $\mu(t)$.

Любую систему можно представить также и её функциональной схемой. Функциональная схема представляет собой схему соединения элементов, различаемых по их функциональному назначению (рис. 3.3): ЗУ — задающее устройство; У — усилитель; О — объект. Задающее устройство вырабатывает задающее воздействие $\alpha(t)$, которое с помощью усилителя усиливается и подается на вход объекта с тем, чтобы выходная величина объекта $\beta(t)$ приняла требуемое значение $\beta_{\text{тр}}(t)$. Однако на практике выходная величина объекта

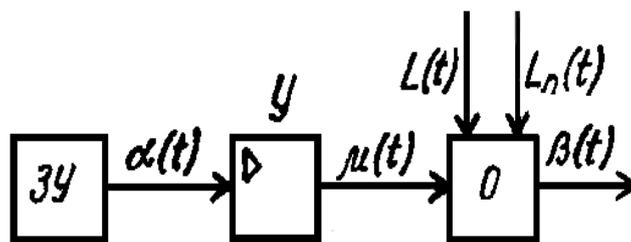


Рис. 3.3: Функциональная схема системы.

$\beta(t)$ по ряду причин отклоняется от требуемого значения. Одной из этих причин является влияние различного рода внешних возмущающих воздействий на объект (на рис. 3.2 и 3.3 показано одно внешнее возмущающее воздействие $L(t)$).

Другой причиной является влияние изменения параметров объекта или других элементов системы, т. е. влияние параметрических возмущающих воздействий $L_n(t)$ (рис. 3.2 и 3.3).

Третья причина, вызывающая отклонение $\beta(t)$ от $\beta_{\text{тр}}(t)$, обусловлена изменением требуемого значения управляемой величины (изменением требуемой температуры закалочной печи, произвольным изменением угловых координат цели). Если требуемое значение выходной величины изменяется, то для соответствующего изменения действительного значения выходной величины необходимо изменить воздействие на входе объекта. При изменении же воздействия на входе объекта, обладающего инерционностью, возникает переходный процесс, в течение которого выходная величина не будет соответствовать требуемому значению.

Отклонение выходной величины от требуемого значения может возникать не только в переходном, но и в установившемся динамическом режиме, когда требуемое значение изменяется, например, с постоянной скоростью или постоянным ускорением.

Отклонение $\beta(t)$ от $\beta_{\text{тр}}(t)$ под влиянием перечисленных причин может достигать недопустимо больших значений, при которых нарушается обеспечиваемый объектом технический процесс. Поэтому возникает задача уменьшения отклонений выходных величин объектов от требуемых значений. Эта задача является основной задачей управления (регулирования).

Наметим пути решения задачи управления. Как отмечалось, на выходную величину $\beta(t)$ объекта (рис. 3.2), с одной стороны, влияет возмущающее воздействие $L(t)$, приложенное к определенной точке объекта, вызывая нежела-

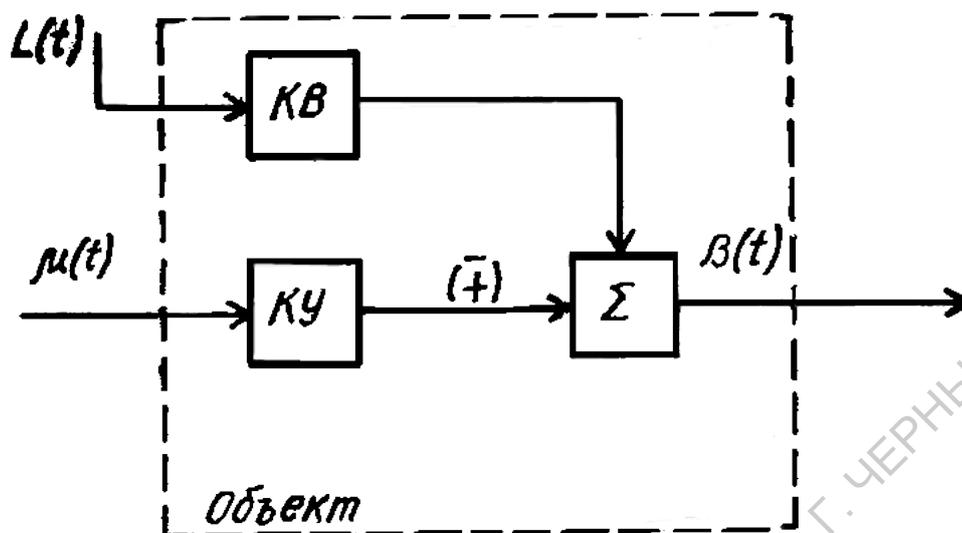


Рис. 3.4: Схема каналов возмущения и управления объекта.

тельное изменение $\beta(t)$ — её отклонение $\Theta_L(t)$ от требуемого значения. Канал, через который возмущающее воздействие $L(t)$ влияет на выходную величину $\beta(t)$ объекта, называют каналом возмущения КВ объекта (рис. 3.4). С другой стороны, на $\beta(t)$ можно влиять подачей соответствующего воздействия $\mu(t)$ на вход объекта, добиваясь уменьшения или устранения отклонения $\beta(t)$ от требуемого значения. Канал влияния входного воздействия на выходную величину объекта будем называть каналом управления КУ объекта. Выходные величины каналов складываются (вычитаются) с помощью сумматора Σ .

Отклонение, возникающее в связи с изменением требуемого значения выходной величины, также может быть уменьшено или устранено подачей на вход объекта воздействия, являющегося определенной функцией от требуемого значения и характеристик объекта.

Таким образом, задача устранения или уменьшения отклонения выходной величины объекта от требуемого значения (задача управления) сводится к нахождению необходимой зависимости воздействия на входе объекта от возмущающих воздействий, изменения требуемого значения выходной величины и характеристик объекта и реализации этой зависимости. Воздействие на входе объекта, полученное в результате преобразования факторов, вызывающих отклонение $\beta(t)$ от $\beta_{\text{тр}}(t)$ или самого отклонения и обеспечивающее уменьшение этого отклонения (и тем самым приближающее функционирование объекта в соответствии с алгоритмом функционирования), называется управляющим воздействием. Выходная величина объекта называется управляемой величиной, а объект — управляемым объектом. Математическое выражение

зависимости управляющего воздействия от возмущающих воздействий, изменения требуемого значения управляемой величины, отклонения управляемой величины, и характеристик объекта называется алгоритмом управления (регулирования).

После приведенных сведений сформулируем определение управления: под управлением понимается осуществление воздействий, получаемых в результате обработки имеющейся информации и направленных на уменьшение отклонения функционирования управляемого объекта от заданного алгоритмом функционирования. Очевидно, что необходимость в управляющем воздействии возникает в тех случаях, когда процесс в объекте отклоняется от предписаний, заданных алгоритмом функционирования.

Система, состоящая из управляемого объекта и автоматического управляющего устройства, взаимодействующих между собой в соответствии с алгоритмом управления, называется автоматической системой (системой автоматического управления, или системой автоматического регулирования).

3.5 Основные принципы управления

В зависимости от способов формирования управляющего воздействия различают следующие принципы управления: по возмущению; по отклонению управляемой величины от требуемого значения; принцип комбинированного управления.

3.5.1 Принцип управления по возмущению (разомкнутые САУ)

Для уменьшения или устранения отклонения управляемой величины от требуемого значения, вызываемого влиянием того или иного возмущающего воздействия необходимо, чтобы управляющее воздействие было определенной функцией этого влияющего фактора и характеристик объекта. При управлении по возмущению ставится задача компенсации влияния возмущающего воздействия на управляемую величину.

Принцип управления по возмущению состоит в том, что для уменьшения или устранения отклонения $\Theta_L(t)$ управляемой величины от требуемого значения, вызываемого возмущающим воздействием $L(t)$, измеряется это воздействие и в результате его преобразования вырабатывается управляющее воздействие $\mu(t)$, которое, будучи приложено ко входу объекта УО, вызывает компенсирующее отклонение $\Theta_\mu(t)$ управляемой величины противоположного знака по сравнению с отклонением $\Theta_L(t)$.

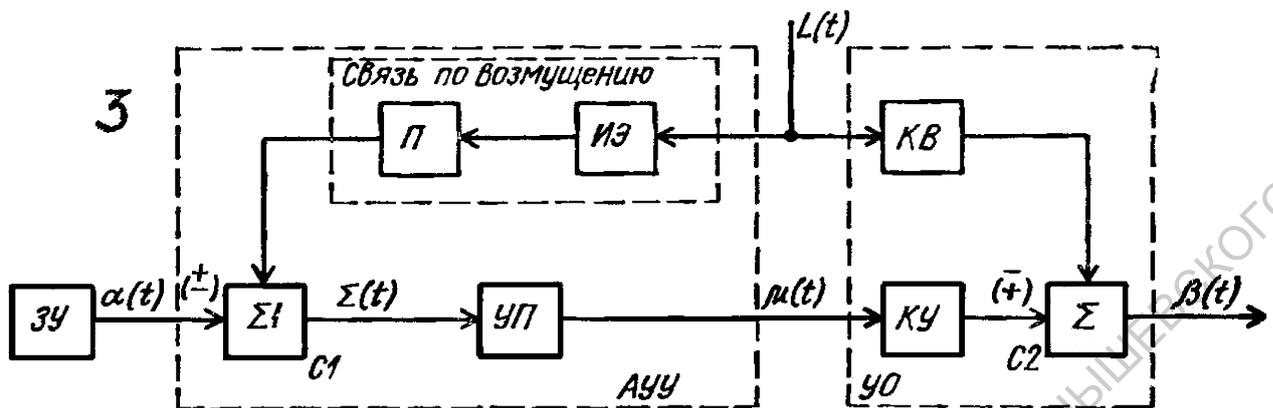


Рис. 3.5: Функциональная схема системы с принципом управления по возмущению.

Измерение возмущающего воздействия $L(t)$ осуществляется с помощью измерительного элемента ИЭ (рис. 3.5), а его преобразование — с помощью преобразователя П. Измерительный элемент и преобразователь образуют связь по возмущению.

Характеристика, достоинства и недостатки САУ с принципом управления по возмущению. В системах с принципом управления по возмущению для формирования управляющего воздействия используется непосредственная информация о возмущающем воздействии (т. е. информация о причине, вызывающей отклонение). Поэтому в этих системах возможна полная компенсация влияния возмущающего воздействия на управляемую величину, т. е. возможно достижение инвариантности (независимости) управляемой величины относительно данного возмущающего воздействия.

Рассмотренным способом можно компенсировать влияние каждого из возмущающих воздействий в отдельности. Однако на практике обычно не удается компенсировать влияние всех возмущающих воздействий, так как значительная часть воздействий не поддается измерению и при компенсации всех возмущающих воздействий получается сложная система. На практике компенсируются лишь основные возмущающие воздействия, наиболее резко влияющие на управляемую величину. В системах управления, задача которых состоит в поддержании постоянства управляемой величины (т. е. в системах стабилизации), основным возмущающим воздействием обычно является изменение нагрузки.

Система с принципом управления по возмущению является разомкнутой САУ. В ней процесс управления не зависит от результатов (управляемая ве-

личина не измеряется и не производится никаких действий, если она не соответствует требуемому значению) и наблюдается только прямое воздействие.

Из приведенной характеристики САУ с принципом управления по возмущению видно, что они обладают следующими достоинствами:

1. позволяют полностью компенсировать возмущающие воздействия, т. е. в этих системах возможно достижение инвариантности управляемой величины относительно возмущающих воздействий;
2. в них, как в разомкнутых системах, не возникает проблемы устойчивости.

САУ с принципом управления по возмущению присущи следующие недостатки:

1. они устраняют влияние лишь основных возмущающих воздействий, по которым созданы компенсационные каналы; появляется отклонение управляемой величины от требуемого значения с изменением второстепенных возмущающих воздействий, по которым нет компенсационных каналов;
2. в этих системах, как в разомкнутых, появляются отклонения управляемой величины с изменением характеристик объекта и элементов системы;
3. применение принципа управления по возмущению ограничено объектами, характеристики которых известны (можно определить).

3.5.2 Принцип управления по отклонению (замкнутые САУ)

Принцип управления по отклонению состоит в том, что измеряется управляемая величина, сравнивается с требуемым значением (задающим воздействием) и выявляющееся при этом отклонение преобразуется в управляющее воздействие; последнее, влияя на объект, стремится уменьшить или устранить это отклонение.

В состав системы (рис. 3.6) входят следующие элементы:

1. Измерительный элемент ИЭ, который подключается к выходу УО и измеряет управляемую величину $\beta(t)$. Измеренное значение этой величины $\beta_{о.с}(t)$ подается на элемент сравнения.

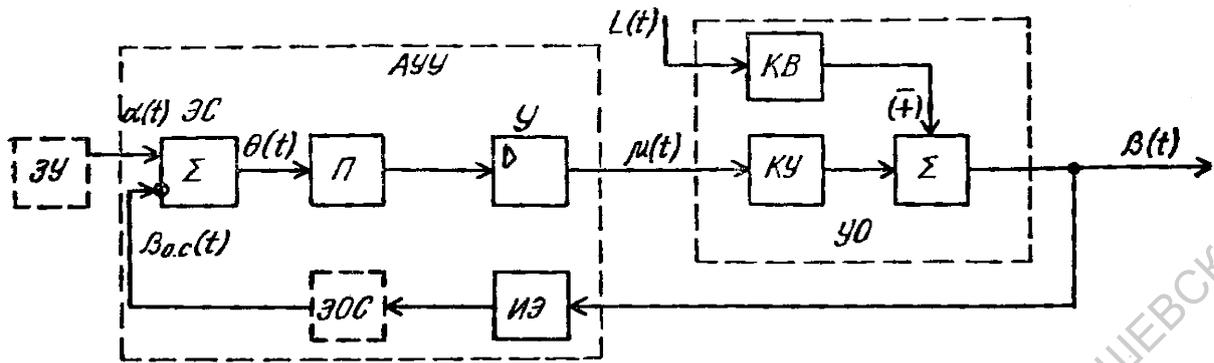


Рис. 3.6: Функциональная схема системы с принципом управления по возмущению.

2. Элемент сравнения ЭС, который сравнивает измеренное значение управляемой величины $\beta_{о.с}(t)$ с задающим воздействием $\alpha(t)$ и определяет отклонение (сигнал рассогласования) между ними: $\Theta(t) = \alpha(t) - \beta_{о.с}(t)$. Инвертирующий вход элемента сравнения означает, что сигнал $\beta_{о.с}(t)$ вычитается.

3. Преобразователь П, в котором при соответствующем преобразовании отклонения, учитывающем характеристики объекта и элементов системы, формируется управляющее воздействие. В простейшем случае управляющее воздействие может быть величиной, пропорциональной отклонению. В общем случае алгоритм управления является более сложной функцией, предусматривающей введение в управляющее воздействие как производных, так и интегралов от отклонения. Преобразователь выполняется в виде различного рода корректирующих устройств. В зависимости от степени сложности необходимого преобразования сигнала рассогласования корректирующее устройство может быть либо простейшей электрической цепью, либо сравнительно сложным электронным вычислительным устройством.

4. Усилитель У, обеспечивающий усиление выходной величины преобразователя до значения, достаточного для поддержания требуемого режима работы объекта.

5. Управляемый объект УО, в котором происходит процесс, подлежащий управлению.

Измерительный элемент, который измеряет управляемую величину на выходе объекта и подает её на элемент сравнения (вход системы), образует главную обратную связь системы. Иногда в цепь главной обратной связи наряду с ИЭ включаются и другие элементы (элементы обратной связи ЭОС), осуществляющие усиление или необходимое преобразование управляемой вели-

чины. Сигнал, поступающий с выхода главной обратной связи на вход (элемент сравнения) системы, называется сигналом главной обратной связи, а разность между задающим воздействием и сигналом главной обратной связи называется сигналом ошибки. Поскольку основной особенностью систем с принципом управления по отклонению является наличие обратной связи, этот принцип называют также принципом обратной связи. Поскольку в САУ с принципом управления по отклонению управляемая величина через главную обратную связь поступает на элемент сравнения (на вход системы), то САУ с принципом управления по отклонению является замкнутой системой, процесс управления в которой зависит от его результатов.

Характеристика, достоинства и недостатки САУ с принципом управления по отклонению. В САУ с принципом управления по отклонению управляющее воздействие получается в результате преобразования отклонения, которое может быть вызвано различными факторами. Поэтому в этих системах уменьшается отклонение независимо от того, какими из факторов оно вызвано. Напомним, что в САУ с принципом управления по возмущению уменьшаются или устраняются отклонения, вызываемые только теми факторами, по которым имеются компенсационные связи.

Поскольку в системах с принципом управления по отклонению уменьшаются отклонения, возникающие и при изменении параметров элементов системы, то замкнутые системы будут менее чувствительны к изменениям параметров её элементов по сравнению с разомкнутыми системами, где отклонения, вызываемые изменением параметров их элементов, не компенсируются.

В системах с принципом управления по отклонению управляющее воздействие получается в результате преобразования сигнала отклонения, а не самого фактора, вызвавшего отклонение, например, возмущающего воздействия (т. е. в результате преобразования следствия, а не самой причины), поэтому оно не может оказать на объект обратное влияние без запаздывания по сравнению с возмущающим воздействием. Следовательно, принцип управления по отклонению не дает возможности полного устранения отклонения, т. е. достижения абсолютной инвариантности. Этот вывод не относится к системам с принципом управления по отклонению, в которых осуществляется косвенное измерение возмущающего (задающего) воздействия с помощью дифференциальных «вилок» или введены специальные связи.

Системы с принципом управления по отклонению обладают следующими достоинствами:

- 1) уменьшают отклонение управляемой величины от требуемого значения независимо от того, какими факторами (внешними возмущающими воздействиями, изменением параметров элементов системы, изменением задающего

воздействия) оно вызвано;

2) менее чувствительны к изменениям параметров элементов системы, по сравнению с разомкнутыми системами.

Системам с принципом управления по отклонению присущи следующие недостатки:

1) в простых одноконтурных системах с принципом управления по отклонению нельзя достичь абсолютной инвариантности;

2) в системах с принципом управления по отклонению, как в замкнутых системах, возникает проблема устойчивости.

Благодаря существенным преимуществам системы с принципом управления по отклонению нашли широкое распространение в технике.

3.5.3 Принцип комбинированного управления

В технике широко применяют САУ с принципом комбинированного управления, сочетающим принципы управления по отклонению и по возмущению — комбинированные системы. В комбинированных системах принцип управления по отклонению реализуется с помощью главной обратной связи, а принцип управления по возмущению — с помощью компенсационных связей.

В комбинированных системах компенсационная связь по основному возмущению (задающему воздействию) устраняет составляющую ошибки, вызываемую этим возмущением (изменением задающего воздействия), а в результате действия обратной связи уменьшаются ошибки, вызываемые второстепенными возмущающими воздействиями, по которым нет компенсационных связей. Если с помощью компенсационных связей не полностью устраняются ошибки, вызываемые основными возмущающими (задающими) воздействиями, то остаточные ошибки также уменьшаются с помощью обратной связи.

Характеристика САУ с принципом комбинированного управления.

Для формирования управляющего воздействия в комбинированных системах используется как непосредственная информация об основных возмущающих воздействиях (изменении задающего воздействия), так и отклонение управляемой величины от требуемого значения, вызываемое всеми возмущающими воздействиями (изменением задающего воздействия). Благодаря этому:

1. в комбинированных системах с помощью компенсационных связей возможно достижение полной компенсации ошибок, вызываемых основными возмущающими и задающим воздействиями (возможно достижение инвариантности);

2. наряду с возможностью полной компенсации ошибок, вызываемых основными воздействиями, в комбинированных системах с помощью обратной связи уменьшаются ошибки, вызываемые второстепенными возмущающими воздействиями, по которым нет компенсационных связей, а также недокомпенсированные ошибки от основных воздействий;
3. при нарушении условий компенсации возмущающего воздействия возникающая ошибка уменьшается замкнутой системой, т. е. комбинированные системы менее чувствительны к изменениям параметров разомкнутых каналов, чем разомкнутые САУ;
4. благодаря наличию разомкнутых компенсационных каналов в комбинированных системах не так остро стоит проблема устойчивости, как в замкнутых САУ.

Таким образом, комбинированные САУ являются наиболее совершенными системами, обладающими высокой точностью управления.

На рассмотренных принципах строятся не только технические системы автоматического управления, но также и системы управления в обществе и регуляционные системы в живых организмах. Поэтому методы исследования технических систем автоматического управления в определенной мере могут быть использованы для исследования систем управления в обществе и живой природе.

Глава 4

Физиологическое моделирование

4.1 Теория управления и биосистемы

Для понимания процессов, протекающих в биосистеме, необходимо учитывать две стороны её функционирования. Одна из них связана с тем, что система — открытая: это процессы получения, накопления, передачи и использования энергии. Эти процессы обеспечивают возможность сохранения структуры, рост и выполнение всех специфических функций биологической системы.

Другая сторона функционирования связана с управлением энергетическими процессами; она включает восприятие, хранение, переработку и использование информации. Информационно-управляющие механизмы в системе определяют, какие энергетические процессы и с какой скоростью происходят в ней. Наиболее общей задачей управляющих систем организма является сохранение его энергетической основы, создание благоприятных условий для постоянства её функционирования при меняющихся условиях внешней среды. Именно поэтому считается, что кибернетические механизмы для того и существуют, чтобы обеспечить стабилизацию и сохранение энергетической части организма.

Представление биологической системы в виде двух взаимодействующих компонент — энергетической и управляющей — представляет собой основу системного подхода к анализу структуры биосистем. На рис. 4.1 показана схема потоков энергии и информации в организме животного. Энергетическая компонента организма обозначена как МС (метаболическая система), а управляющая часть представлена в виде блока регуляторных механизмов (генетическое и физиологическое управление) и блока эффекторов. Основ-

ным элементом схемы здесь является, безусловно, метаболическая система — совокупность процессов обмена веществ, происходящих в клетках животного организма. Одной из главных функций метаболической системы является снабжение систем и органов организма энергией.

На рисунке (4.1), как и во всем дальнейшем изложении, мы используем широкие двойные стрелки для обозначения передачи одновременно не одного, а целой группы сигналов, веществ и т.д. Поскольку эта схема содержит одновременно множество управляющих цепей, выделим в ней три главных контура связей. Структура организма поддерживается механизмами генетического управления. Получая от остальных систем энергию и информацию (в виде метаболитов — продуктов обмена веществ, а в период становления организма — в виде гормонов роста), генетическая система управляет процессами синтеза необходимых веществ и поддерживает жизнедеятельность остальных систем организма (рис. 4.2 а). Процессы в генетической части протекают достаточно медленно: характерными для нее временами являются долгие интервалы времени, связанные с процессами роста, становления организма и его старения, процессы регенерации тканей и т.п. Поведенческие реакции организма осуществляются системой физиологического управления (рис. 4.2 б).

Функционирование эффекторов и других систем, потребляющих энергию (мышцы, органы обоняния, осязания, работающие ткани внутренних органов), приводит к увеличению расхода вещества и энергии. Этот расход должен компенсироваться увеличением темпов синтеза веществ и энергии в метаболической системе. На этом уровне физиологическое управление обеспечивает адекватное снабжение всех подсистем в соответствии с возникающими потребностями (рис. 4.2 в).

Процессы в физиологических системах управления организма протекают значительно быстрее, чем в генетической. Характерное время процессов восстановления после физической нагрузки, например, составляет 15–20 мин. Поэтому генетическая система на рис. 4.2, а образует структуру рассматриваемой биосистемы, в то время как быстрые поведенческие и физиологические процессы в системах рис. 4.2 б, в определяют ее функцию. Организация живого есть единство структуры и функции — устойчивости и подвижности. «То, что называют структурой, является медленным процессом большой продолжительности; то, что называют функцией, является быстрыми процессами короткой продолжительности».

Таким образом, само строение биосистемы отражает здесь две главные ее характеристики — процессы обмена веществ (открытый характер) и процессы управления.

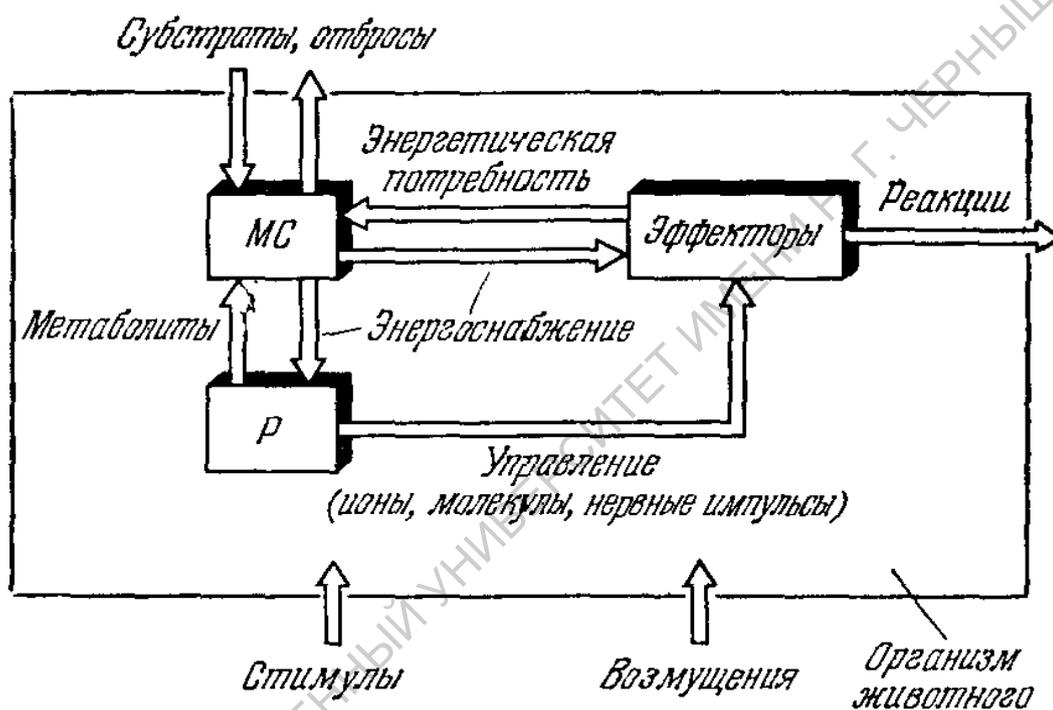


Рис. 4.1: Схема потоков энергии и информации в организме животного. МС — метаболическая система, Р — регуляторные механизмы, включающие элементы генетического и физиологического управления. Все части организма потребляют метаболическую энергию, поставляемую МС. Целью управления является поддержание стационарного неравновесия в энергетической системе организма и сохранение ее структуры.

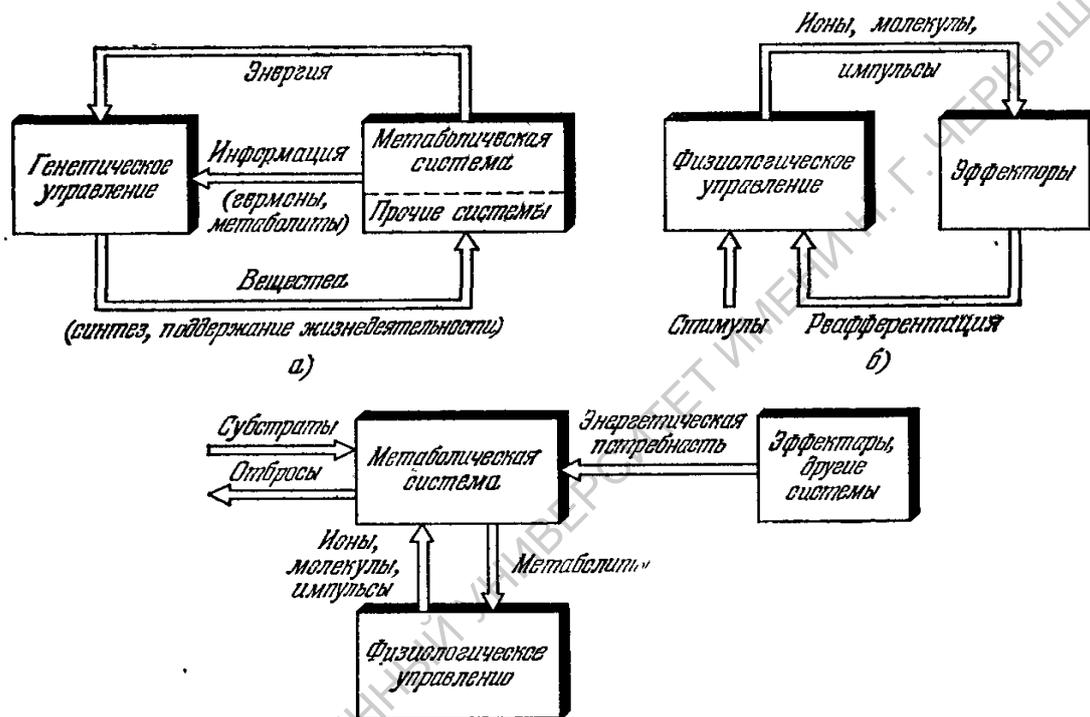


Рис. 4.2: Главные контуры управления в организме животного, а) Генетическая система, управляющая синтезом веществ и поддерживающая структуру остальных подсистем организма; б) система физиологического управления, определяющая поведенческие реакции организма; в) система физиологического управления, обеспечивающая снабжение всех подсистем в соответствии с их метаболическими потребностями.

4.1.1 Принцип биологического эпиморфизма

Как бы ни отличались организмы по своей физико-химической конструкции, отношения между их биологическими свойствами (такими как перемещение организма, процессы получения и использования пищи, выделительные процессы) остаются всегда одними и теми же, т. е. инвариантны для всех организмов. Однако перечисленные функции у высших организмов по сравнению с такими же функциями у низших включают намного больше элементарных компонент, элементарных процессов. «Значит, природа соответствия между процессами или биологическими свойствами высших и низших организмов такова, что одному элементарному процессу у низшего организма соответствует несколько элементарных процессов у высшего». Поскольку такое соответствие называется в математике эпиморфизмом, сам принцип эпиморфного отображения организмов друг на друга был назван принципом биологического эпиморфизма.

Принцип биологического эпиморфизма был предложен Н. Рашевским для сравнительного анализа аналогичных процессов или свойств у разных типов организмов.

Нас интересуют сейчас процессы управления в биосистемах. Поэтому мы можем сформулировать принцип биологического эпиморфизма применительно к управляющим механизмам биологических систем. Механизмы управления, обеспечивающие основные биологические свойства высших и низших организмов, таковы, что они находятся в эпиморфном отношении: одному элементарному механизму управления у низших организмов соответствует множество элементарных механизмов у высшего.

В дальнейшем изложении этот принцип окажется для нас очень и очень важным. Дело в том, что в процессе накопления сложности сами биосистемы могут приобретать новые регулятивные свойства. Рассмотрим, например, способность различных биосистем к адаптации. В простой системе адаптация связана с изменением относительно небольшого числа элементарных процессов, и приспособительные возможности системы ограничены тем, что эти процессы поочередно выходят на некоторые граничные, предельные режимы. Когда «последний» из процессов выйдет на такой режим, способность системы к дальнейшей адаптации окажется исчерпанной. Очевидно, что в сложной эпиморфной системе возможности к адаптации могут быть значительно большими, чем в простой.

Аналогичным образом можно связать с биологическим эпиморфизмом и возникновение гомеостатических свойств в системе, понимаемых как малая чувствительность ее управляющих механизмов к вариациям внешней среды. Когда некоторая функция в простой системе обеспечивается малым количе-

ством механизмов, на долю каждого из них приходится относительно большая нагрузка. В ответ на внешнее возмущение реакция каждого механизма оказывается ощутимой — механизмы чувствительны к изменениям, происходящим в среде. В эпиморфной системе, где таких механизмов много больше, их одновременное включение может привести к уменьшению нагрузки, приходящейся на каждый элементарный процесс, каждый регулятор. В результате чувствительность каждого из регулирующих механизмов к возмущениям становится меньше — возникают гомео-статические свойства.

Ниже мы будем говорить о позднем (в эволюционном плане) возникновении гомеостаза у организмов, а при рассмотрении вопросов моделирования гомеостаза специально остановимся на соотношении «сложность — качество». Сложные процессы возможны только в системе, богатой связями между элементами Эпиморфизм, возникающий в ходе эволюции, как раз и способствовал возникновению сложной системы связей между элементарными компонентами организмов; на определенном этапе развития этих связей «хватает» не только на то, чтобы поддерживать жизнедеятельность системы, обеспечивая нужные ей темпы потребления вещества и энергии, но и на достижение малой чувствительности переменных внутренней среды к внешнему окружению.

Интересно, что аналогичные процессы наложения качеств по мере накопления структурной сложности происходят и в сложных технических системах. Сначала возникает обычная устойчивость, затем способность системы хорошо функционировать при помехах — помехоустойчивость, затем управляемость и, наконец, способность системы к самоорганизации.

4.1.2 Открытые системы

Понятие открытой системы впервые было введено в обиход биологической науки Л. фон Бергаланфи в 1932 г. Для такой системы характерно, что в нее постоянно извне вводятся вещества, которые внутри системы подвергаются различным реакциям. В результате процессов анаболизма в системе возникают компоненты более высокой сложности, утилизируемые организмом. Одновременно идут процессы катаболизма, конечные продукты которого выводятся из системы. Совокупность процессов анаболизма и катаболизма называется метаболизмом.

Одной из наиболее характерных черт открытых систем является то, что в них достигается состояние подвижного равновесия. При этом структура системы остается постоянной, но это постоянство сохраняется в процессе непрерывного обмена и движения составляющих её веществ.

На рис. 4.3 показана простая схема такой открытой системы. На её входе

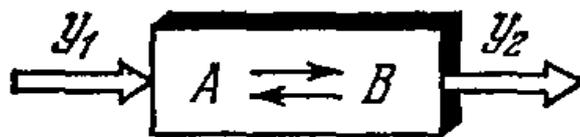


Рис. 4.3: Простая схема открытой системы

— поток поступающих веществ — субстратов y_1 , на выходе — поток продуктов катаболизма y_2 . Внутри системы вещества A в ходе обратимых реакций преобразуются в вещества B . Разумеется, в любой биологической системе пути метаболических реакций гораздо сложнее: они идут параллельно друг другу, расходятся или сходятся. Сама система метаболических реакций обладает в значительной степени ауторегуляторными свойствами, которые возникают из-за наличия в ней цепей обратных и прямых связей.

Пример такой более сложной биохимической системы приведен на рис. 4.4.

Обратная связь состоит в угнетении ключевого фермента E_1 конечным продуктом S_n , образующимся из исходного субстрата S_0 через ряд промежуточных форм S_1, \dots, S_{n-1} . Ферменты, катализирующие промежуточные реакции, обозначены через E_1, E_2, \dots, E_n ; M_1 — вещества, способные активировать или угнетать фермент E_1 ; M_k — такие же вещества для фермента E_k .

Прямая связь представлена механизмом активации фермента веществом — предшественником субстрата. Соединение S_n служит субстратом для фермента E_k , чувствительного к активирующему действию исходного субстрата S_0 . Изменение скорости y_0 образования исходного субстрата S_0 действует как внешнее возмущение на S_n — при увеличении скорости y_0 возрастает и концентрация S_n . Однако активация фермента E_k субстратом S_0 компенсирует возмущающее действие y_0 за счет увеличения скорости потребления вещества S_n в реакциях, катализируемых E_k .

В биохимических системах эти механизмы дублируются, «запараллеливаются» более инерционными механизмами. Таковы, например, репрессия синтеза ферментов E_1, E_2, \dots, E_n конечными продуктами (обратная связь) и индукция синтеза этих ферментов исходным субстратом S_0 .

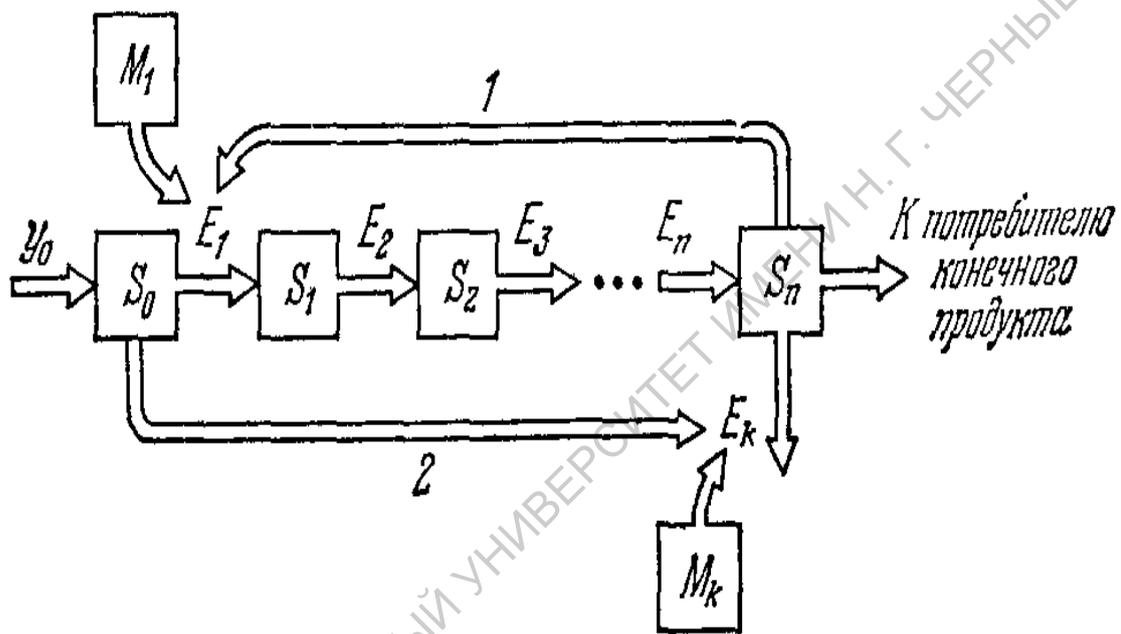


Рис. 4.4: Система метаболических реакций, обладающая ауторегуляторными свойствами. В системе имеется обратная (1) и прямая (2) связи. Прямая связь представляет собой активацию предшественником субстрата, которая приводит к увеличению скорости потребления продукта S_n в «побочных» реакциях, катализируемых ферментом E_k . Обратная связь — угнетение фермента E_1 конечным продуктом S_n . Изменение скорости y_0 образования исходного субстрата S_0 является возмущением в системе.

4.1.3 Пассивное и активное управление в живых системах

Совместное действие большого числа механизмов прямых и обратных связей, регулирующих активность и скорость синтеза ферментов, позволяет поддерживать концентрации конечных продуктов почти на неизменном уровне при изменении внешних возмущений в довольно широких пределах. Механизмы рассмотренного типа как бы «встроены» в регулируемую систему, поэтому для них используется термин «внутреннее управление».

Внутреннее управление является пассивным. Это означает, что в реально существующей системе поддержание стационарного равновесного состояния или возникновение характерных ответов системы на внешнее возмущение не требует какой-либо метаболической работы. Пассивные механизмы регуляции свойственны не только биохимическому уровню организации биосистем. Поддержание нормальной пространственной ориентации у рыб обеспечивается пассивным механизмом регуляции — центр плавучести и центр тяжести не совпадают, так что при отклонении осевой плоскости рыбы от вертикальной возникает крутящий момент, возвращающий тело в нормальное положение.

Пассивное управление в системе возникает как результат взаимодействия элементов, составляющих «саму систему». Л. фон Берталанфи предложил для такого типа управления термин «динамическое взаимодействие» или «первичная регуляция». Типичным примером пассивного управления в системах является взаимодействие между веществами, находящимися в системе, и потоками этих веществ, циркулирующими внутри системы и пересекающими границы системы со средой.

Пассивные механизмы управления лежат на грани, отделяющей управляемые системы от неуправляемых. В теории управления решение о том, относить или не относить данную систему к классу управляемых систем, выносится на основании наличия в описании этой системы обратных связей. Если обратная связь существует, система считается управляемой. Пассивные системы в теории управления обычно относятся к неуправляемым. Рассмотрим, например, такую техническую систему, как мост. При действии на него нагрузки мост прогибается, и в результате деформации возникают силы, уравновешивающие действие нагрузки. Можно сказать, что мост обладает механизмами сохранения своей формы. Поскольку, однако, механизмы упругой деформации работают пассивно, только за счет энергии, поступающей извне, подобные объекты в теории управления не представляются в виде систем с обратной связью и считаются поэтому неуправляемыми. Простое и подробное освещение этого вопроса имеется во вводных разделах книги.

В теоретической биологии складывается противоположная традиция: пас-

сивные механизмы относятся к системам управления. Термин «пассивная система управления» введен У. Р. Эшби и вошел в учебники по теории управления для биологов. Пассивный характер управления в живых системах означает, что «если заданы всеобщие химические и физические законы, а также компоненты и организация живой системы..., то для поддержания стационарного состояния или возникновения характерных ответов системы не требуется какой-либо метаболической работы».

Одна из причин того, что пассивные регулирующие механизмы в живых системах относятся к системам управления, состоит в следующем. Если в неживой природе можно указать множество объектов, в которых присутствуют одни лишь пассивные механизмы, как в упомянутом выше примере с мостом, то в живых системах пассивные механизмы управления сплошь и рядом составляют только «нижний этаж» иерархических управляющих структур, на который накладываются следующие этажи, составленные уже из активных механизмов управления.

Как мы увидим, многие интересные черты гомеостатического поведения биологических систем получают простое объяснение, если биосистема представляется в виде элемента, охваченного «пассивной» связью, которая затем дублируется активными обратными связями. Для физиологических систем, например, взаимодействие пассивной и активной регуляции приводит к возникновению характерной зависимости переменных внутренней среды от окружающих условий — так называемой регуляционной или гомеостатической кривой.

Если пассивное управление в равной мере присутствует в живой и неживой природе, то активное управление в природе специфично только для биосистем. Активное управление требует от биосистемы метаболических затрат, поскольку управление осуществляется специальными механизмами, обособленными от элементов системы, которыми они управляют. В этом смысле активное управление является внешним, подобно тому, как пассивное управление является внутренним.

Внешние управляющие механизмы «накладываются» на внутренние, образуя вместе с ними единую систему замкнутых контуров управления, комплекс прямых и обратных связей в системе. В живых системах, в отличие от рассмотренных выше технических систем, пассивное управление также может быть представлено в виде обратной связи.

Внешние механизмы управления организованы так, что любое возмущение v на систему, изменяющее ее состояние, обнаруживается (либо непосредственно, либо по тем эффектам в системе, которые обусловлены этим возмущением) при помощи специальных чувствительных элементов. Сигнал с чувствительного элемента поступает на внешние элементы контура, где обраба-

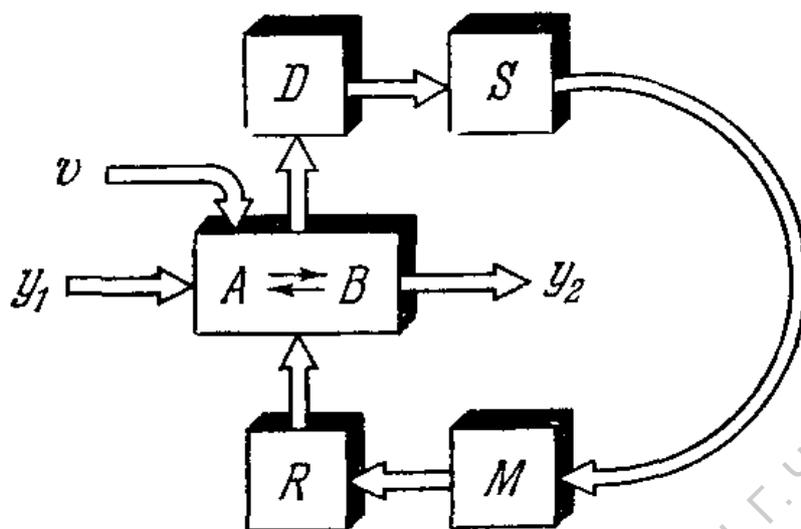


Рис. 4.5: Наложение контура внешнего активного управления на внутренние механизмы управления. Возмущение v изменяет реакцию $A \rightleftharpoons B$; эффект D воспринимается чувствительным элементом S , сигнал с которого поступает в устройство обработки информации M . Исполнительный элемент (эффектор) R формирует управляющий сигнал, парирующий действие возмущения v ; y_1 — входной поток веществ, y_2 — выходной поток.

тывается, в результате чего вырабатывается ответный управляющий сигнал, противодействующий влиянию возмущения на систему.

На рис. 4.5 показано, как простой внешний контур активного управления накладывается на внутренний механизм пассивного управления в метаболической структуре биосистемы. В реальных биосистемах имеется множество механизмов пассивного управления, на которые накладываются многочисленные механизмы активного управления. На рис. 4.6 представлена схема наложения активных механизмов регуляции на пассивные механизмы окислительных процессов в системе физиологического уровня — системе кислородного снабжения организма. Показанное на рисунке изображение является интерпретацией в терминах активного и пассивного управления схемы.

Активные механизмы регуляции, по всей видимости, широко распространены и на клеточном уровне. Хотя фактически о тех специфических стадиях регуляторных процессов, где происходит потребление метаболической энергии, известно очень немного, нет сомнений в том, что в метаболизме клетки «должны существовать и будут, несомненно, обнаружены какие-то специальные пункты подачи энергии в регуляторный процесс». Возможно, одним из технических аналогов активных регулирующих процессов клеточного и суб-

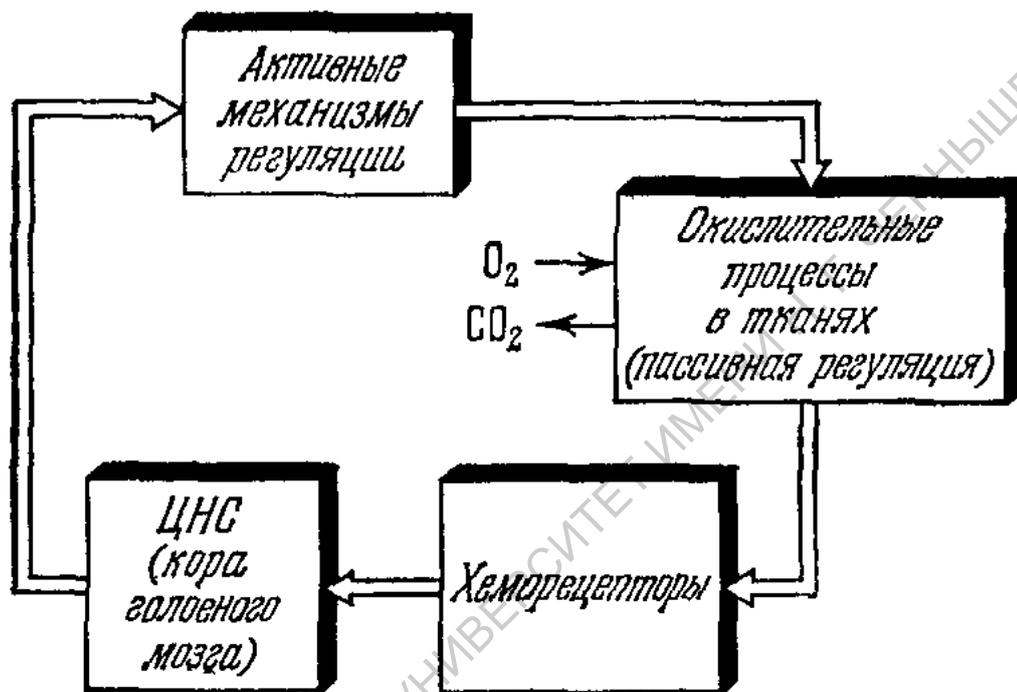


Рис. 4.6: Наложение активных механизмов регуляции на пассивные механизмы окислительных тканевых процессов. Система окислительных процессов в тканях обладает саморегуляторными свойствами, основу которых составляют пассивные механизмы регуляции. Механизмы активной регуляции составляют высший этаж управляющей системы. В схеме рассматриваются следующие активные механизмы регуляции: целенаправленные изменения дыхательного объема, жизненной емкости легких, объема резервного воздуха, глубины вдоха, частоты дыхания, ударного объема сердца, частоты пульса, объемной скорости кровотока, величины сопротивления сосудов, количества гемоглобина в крови, величины кислородной емкости крови и, наконец, эритропоэза.

клеточного уровня является механизм случайного поиска. Своеобразная модель механизма активной регуляции в субклеточных структурах была исследована в работе. Этот механизм представляет собой реализацию случайного поиска на уровне митохондриальных структур нейронной клетки, целью которого является «оптимизация энергетического режима нервной клетки».

Иногда считается, что активные процессы управления в биосистемах реализуются единственным видом отрицательной обратной связи — отрицательной обратной связью по рассогласованию. Такой точки зрения придерживается, в частности, Л. фон Бергаланфи: «динамическое взаимодействие в открытых системах применяется к первичным регуляциям, как в клеточном метаболизме», а «модель обратной связи отражает то, что может быть названо вторичной регуляцией в метаболизме и других областях, т. е. регуляцию путем предварительно установленных механизмов и фиксированных связей».

Из рассмотренных примеров, однако, уже сейчас ясно, что такая простая модель механизмов регуляции, как отрицательная обратная связь по рассогласованию в одноконтурной системе, может быть лишь самым первым приближением при исследовании активной регуляции в биосистемах. Эта модель является не единственным и не всегда лучшим способом описания сложных систем и механизмов управления в биологических объектах.

4.2 Механизмы устойчивости

4.2.1 Устойчивость и изменчивость

В условиях, когда среда является источником множества постоянно действующих возмущений, или шума, наличие механизмов устойчивости должно быть признано непременным условием существования сколько-нибудь организованных структур в окружающем нас мире. Причем, согласно закону необходимого разнообразия, сформулированного У.Р. Эшби (1959), мощность этих механизмов, т.е. количество контролируемых ими состояний, должно быть не меньше мощности всей суммы шумов. В противном случае устойчивостью обладал бы только однородный хаос вещества и энергии, лишенный организованности и, значит, информации.

Сказанное ни в какой степени не отменяет закона эволюции Вселенной. Изменчивость является более общим свойством мира, чем устойчивость. Устойчивые состояния лишь ступеньки на общей лестнице развития, независимо от того, ведет она вверх, к упорядочению, или вниз, к беспорядку. Абсолютная устойчивость означала бы только конец развития. На деле в обозримом мире устойчива только тенденция непрерывной эволюции живой и неживой при-

роды.

Связь устойчивости к изменчивости простирается еще глубже. Сохранение систем в большинстве случаев невозможно без адаптивных изменений в самой системе или приспособительных преобразований окружающей среды. Изменения в окружающей обстановке, как правило, должны быть компенсированы внутренними изменениями в системе. Если оставить в стороне те случаи, когда система в силу своей грубости просто нечувствительна к воздействию, природа следует принципу «измениться, чтобы сохраниться».

Под изменчивостью в дальнейшем мы будем понимать четыре разных типа изменений:

- пассивная реакция на внешние изменения, свойственная системам, лишенным механизмов саморегулирования;
- функционирование — обмен веществом, энергией и информацией между системой и окружающей средой. Это нормальный способ существования открытых систем, не предполагающий каких-либо изменений в окружающей среде;
- адаптация — приспособление систем, обладающих механизмом саморегулирования, к меняющейся среде, независимо от того, имеют изменения периодический, случайный или направленный характер. В отличие от пассивной реакции адаптация предполагает наличие в системе более или менее сложной собственной программы поведения;
- саморазвитие — направленный рост или развитие системы, управляемый комплексом внутренних связей и потому независимый (слабо зависимый) от изменений внешней среды. По этому типу развиваются так называемые диссипативные структуры.

Для того чтобы при обсуждении проблемы механизмов устойчивости не возникло недоумения относительно того, о каком из видов устойчивости идет речь, будем придерживаться следующего определения. Устойчивой считаем систему, которая любым способом (см. ниже) сохраняет инвариант в течение времени, достаточно протяженного по отношению ко времени смены инварианта (переходного процесса). Требуется пояснить в этой связи понятие инвариант. В разных ситуациях инвариантом может быть состояние системы или структура, или способ функционирования, или траектория саморазвития. Выбор инварианта зависит как от свойств системы, так и от задач исследования. Обобщая, все это можно назвать принципом организации системы, или информацией (в широком понимании), содержащейся в системе.

Очевидно, принятое определение включает в себя надежность, но не включает устойчивость как скорость процесса восстановления состояния системы после возмущения.

Исходя из сказанного, все механизмы устойчивости можно разделить на четыре группы:

- механизмы, сохраняющие (стабилизирующие) состояния систем;
- механизмы, сохраняющие (стабилизирующие) тип функционирования;
- механизмы, сохраняющие (стабилизирующие) структуру;
- механизмы, сохраняющие (стабилизирующие) направленность (траекторию) движения систем.

Рассмотрим их более подробно.

Системы биологических уровней занимают небольшой интервал в непрерывной иерархии «этажей». Связь между уровнями, как правило, достаточно сильна, поэтому обоснованно судить об устойчивости биосистем можно лишь в том случае, если есть сведения об устойчивости ряда выше- и нижележащих этажей. В последующих разделах будут разобраны принципиальные схемы механизмов устойчивости независимо от того, на каких уровнях они нашли свое воплощение. Распределение механизмов по этажам иерархии будет проанализировано отдельно.

4.2.2 Механизмы стабилизации состояния

Можно назвать шесть механизмов, с действием которых связано более или менее продолжительное пребывание систем в неизменном состоянии:

- инерция,
- ограничение обмена с окружающей средой,
- проточность,
- отрицательная обратная связь,
- положительная обратная связь,
- конкурентная обратная связь.

Наглядное представление о действии инерции дает инерция твердых тел. С увеличением массы тела уменьшается его реакция на одиночный импульс (возмущение), увеличивается время реакции на длительное воздействие одной и той же силы. Закон об инерции находит специфическое преломление в процессах денудации, когда характерное время выравнивания подобных по форме и сложенных сходными породами форм рельефа прямо зависит от их размера. Подобно инерционному телу реагирует на химическое воздействие стоячий водоем, на климатическое воздействие — ледник: амплитуда и скорость ответа на возмущение зависят от массы воды и льда.

Инерционность в расширенном понимании термина свойственна и живым системам. Если биомасса фитоценоза сосредоточена в тканях однолетних травянистых растений — сообщество быстро реагирует на состояние среды, если — в стволах деревьев, то сообщество более инертно. В градостроительстве понятие «инерция» используется для обозначения свойства городской инфраструктуры длительное время сохранять свой план строения и с трудом поддаваться перепланировке. В таком же смысле обладают инерцией сети коммуникаций, отраслевая структура и географическое размещение промышленного производства, причем инерционность систем прямо пропорциональна сумме вложенных в них средств.

Свойством, подобным инерции, обладают системы, которые располагают резервной емкостью, позволяющей безболезненно поглощать поступающие в систему чужеродные элементы. Так, в течение определенного времени может происходить накопление загрязняющих веществ в почве без видимых последствий для структуры косных и биотических компонентов, для плодородия почвы. При этом в барьерных зонах или во всей почвенной толще может происходить нейтрализация загрязнений (загрязнителей), сопровождающаяся необратимым расходом определенных элементов. При выпадении кислотных осадков связывание катионов двуокиси серы происходит при посредстве содержащегося в почве кальция.

Во всех случаях, когда устойчивость состояния определяется инерцией или подобным ей свойством, происходит необратимое расходование некоторого «запаса», определенного качества системы, при этом эффект прямо пропорционален произведению силы воздействия на его длительность и обратно пропорционален «запасу» массы, емкости. Однако ограниченность аналогии для случаев заполнения емкости в том, что по достижении некоторого порога свойства системы меняются скачкообразно, чего не наблюдается в механике.

Приспособления, ограничивающие обмен систем с окружающей средой и таким образом способствующие стабилизации состояния, широко распространены в окружающей нас среде. Здесь можно перечислить пленки поверхностного натяжения на границах веществ с разным фазовым состоянием, клеточ-

ные мембраны, кожный покров и кору живых организмов, наружный хитиновый скелет насекомых, покров из чешуи, перьев, шерсти, костных пластинок и т.п. С другой стороны, стабильность географической среды находится в прямой зависимости от существования магнитного поля Земли, атмосферы с ее ионосферой, озоновым экраном, облачным покровом. Ряд биоценозов находят еще более однородные условия существования под толщей озерной, морской и океанской воды, в пещерах и под слоем почвы. Широко распространен в природе временный переход организмов в закрытое состояние в форме спор и семян, анабиоза, зимней спячки, а также укрывание в норах, гнездах и т.п. Биосистема может спонтанно переходить в более закрытое состояние в ходе своего естественного развития. Так мертвый лед, реликт отступившего ледника, по мере таяния отделяется от среды все более мощной толщей морены, на обнаженных горных породах нарастает изолирующий слой коры выветривания, на многолетней мерзлоте покров растительности.

Человеческое общество усовершенствовало методы «закрывания»: разработаны многочисленные конструкции одежды, жилищ, производственных зданий. Средневековые замки и крепости, новейшие проекты городов под прозрачным колпаком реализуют ту же цель: ограничить влияние окружающей среды.

Механизмы ограничения обмена несмотря на свою распространенность не могут иметь универсального значения, так как полная изоляция невозможна, а главное, для саморегулируемых систем, особенно для живых, это означало бы прекращение обмена веществ. без которого прекратится самое их существование.

К пассивным механизмам, поддерживающим более или менее стабильное состояние систем, следует отнести также проточность. К проточным можно отнести системы, устроенные по типу бассейна с входной и выходной трубами: в одну втекает вода (или любое другое вещество), в другую — вытекает. Соответственно чужеродные вещества, попадающие в систему, затем могут быть вымыты из нее в ходе нормального функционирования. В так называемых каскадных системах проточными оказываются все звенья каскада, кроме последнего. Химические загрязняющие вещества лишь временно задерживаются в бассейне реки, в её русле, в проточных озерах и водохранилищах, но накапливаются в бессточной котловине аридного района. Атмосфера Земли, воды океанов, почвы гумидных территорий, организмы растений и животных, производственные цепочки, состав учеников школ и студентов вузов, призывников армии, отчасти человеческая память — примеры проточных систем. Слабость этого механизма в том, что он хотя и эффективно противостоит одиночным импульсным воздействиям, не срабатывает, когда поток загрязнений не уменьшается.

Следующие механизмы можно отнести к активным стабилизаторам состояния. Активность их заключается в том, что внешнее воздействие включает программу, следуя которой система ослабляет влияние возмущения. Среди таких механизмов основную роль играет отрицательная обратная связь. Поступивший на вход системы импульс, пройдя по цепи обратной связи, складывается с обратным знаком со следующим импульсом, и начальное состояние полностью или частично восстанавливается. Нередко таким механизмом снабжены метаболические системы неживой природы, поддерживающие около нулевой отметки балансовое сальдо вещества или энергии: ледники, бессточные озера, тепло нижней атмосферы, атмосферная двуокись углерода, соли, растворенные в морской воде.

Многочисленные регуляторы отрицательной обратной связи — основа гомеостатических свойств живых организмов, позволяющих им сохранять содержание воды и множества химических веществ в тканях, состав крови, температуру тела и т.п. На уровне популяций численность животных регулируется обратными связями, осуществляющимися, например, в форме эпизоотий, или снижения фертильности самок при перенаселении. Биологические механизмы самоочищения воды и почвы включаются как только избыточное накопление какого-то вещества послужит сигналом к вспышке размножения бактериальной флоры, водорослей, беспозвоночных, грибов, уничтожающих дополнительные количества загрязнителей. Нормальная сбалансированность экономики, построенной на рыночных отношениях, базируется на отрицательных обратных связях, главным образом на связях между спросом и производством товаров и услуг. Глобальные симптомы ухудшения окружающей среды, ведущие к экологическому кризису, обозначают действие возникшей в нашем веке отрицательной обратной связи в системе общество—природа, способной затормозить нерегулируемый иными средствами технический прогресс.

Отрицательная обратная связь — один из наиболее универсальных механизмов стабилизации состояния, но при определенных условиях — ритмичном повторении воздействий и задержке в канале обратной связи — он может превратиться в свою противоположность и стать причиной разрегулирования и даже разрушения системы. В природе такое событие — большая редкость. В технике к ним относится явление флаттера (разрушения от вибрации) самолетов или обрушение мостов от шага идущих в ногу солдат.

Два других типа обратной связи — положительная и конкурентная обратные связи — больше известны в роли нарушителей равновесия систем. Действительно, системы с такими механизмами активно удаляются от состояния неустойчивого равновесия и в общем случае не имеют устойчивого состояния, предопределенного внутренними связями. Однако, как все откры-

тые системы, они способны развиваться лишь в условиях притока вещества и энергии из окружающей среды. Приток ресурсов в заданный объем всегда ограничен. Этот «потолок» не дает системе с обратной связью развиваться беспредельно, она стабилизируется как пружина, упершаяся в стену. Если, конечно, сам поток вещества или энергии не испытывает больших колебаний. Подобным образом поддерживается на максимальном уровне, который допускают запасы кормов, численность популяций животных, размножение которых не зависит от плотности. Продукция и биомасса биоценоза в общих чертах определяются таким же механизмом. Похоже, к предельной емкости биосферы приближается численность человеческой популяции, хотя «потолок» сильно поднят в связи с успехами науки и техники.

В отличие от положительной обратной связи конкурентный механизм выводит к состоянию максимально допустимого развития не единственного претендента, а одну из двух или нескольких подсистем, борющихся за превосходство. Естественное воздействие или сознательное управление могут передать преимущество другой подсистеме, например, другому виду растений, другой фирме и «переключить» систему из одного устойчивого предельного состояния в другое, равнозначное.

4.2.3 Механизмы сохранения типа функционирования

Для природных и социальных систем в некоторых случаях оказывается важнее всего сохранить нормальный порядок процессов, поддерживающих существование открытых систем, обмен веществ. Для решения этой задачи может быть принесена в жертву стабильность состояния и неизменная структура системы. Можно наметить три или четыре механизма, выполняющих эту функцию, хотя в действительности число их, возможно, больше. Сюда мы отнесем надежность, эластичность, «разбегание» по экологическим нишам и «разбегание» в географическом пространстве.

Надежность — технический термин, предполагающий, что система выполняет некоторую заданную извне функцию. Если считать, что системы природы выполняют функцию самосохранения в условиях повсеместного шума, то можно говорить в несколько условном смысле даже о надежности абиотических естественных систем. Основным средством повышения надежности технических устройств является дублирование элементов (подсистем), выполняющих одни и те же функции. Тогда при выходе из строя («отказе») элемента система продолжает действовать так же, как и раньше, опираясь на сохранившиеся аналогичные элементы.

Считается, что наиболее ярко дублирование функций проявляется на организменном уровне системной иерархии. Множество половых и соматиче-

ских клеток в любой момент готовы заменить друг друга. Ряд важных органов природа произвела в двукратном или многократном исполнении: сосудистые пучки, органы фотосинтеза, корни, генеративные органы у растений, конечности, органы зрения, слуха, дыхания, кроветворения у животных, две половины мозга и т.п. Параллельность цепей характерна и для трофических пирамид, где большинство консументов опирается не на один вид продуцента, а на целый ряд.

В экономических системах надежность обеспечивается там, где промышленные предприятия получают сырье и финансирование не из одного, а из нескольких источников, где торговые фирмы ориентируются на ряд поставщиков товаров и рынков сбыта, где средства связи, пути сообщения, источники энергоснабжения могут без большого напряжения заменять друг друга. Недостаток системы с обеспеченной таким образом высокой надежностью — высокий процент непроизводительных затрат энергии, сырья и финансов на поддержание избыточных механизмов, не приносящих явной пользы в «нормальных» условиях, при отсутствии «отказов». Надежность дополнительна к экономичности, поэтому как Природе, так и человеку-созидателю приходится решать задачу отыскания компромиссного решения, не оптимального по каждому из этих требований, но приемлемого для системы в целом.

Эластичность систем предполагает возможность замены одного элемента системы, оказавшегося неэффективным в изменившихся условиях, другим, более подходящим. Луговые степи Курского заповедника сильно меняют свой флористический состав в зависимости от того, сухой или влажный, теплый или прохладный выдался летний сезон. При этом продукция травостоя, утилизация приходящей солнечной радиации существенно не меняется. Долговременные изменения климата могут вызывать смену доминантов в лесных фитоценозах с тем же эффектом — приблизительным сохранением характера функционирования. Явление замещения (субституции) роли доминанта в сообществе одним из трех видов пустынных осок — толстолобиковой, почти вздутой, и вздутой — в зависимости от величины пастбищной нагрузки описано для южной Туркмении. В социальной сфере свойством эластичности обладают структуры государственного аппарата. При смене власти в результате выборов или государственного переворота сменяются работники, но система продолжает функционировать.

Можно считать, что во всех указанных случаях замены элементов системы имеют смысл не сами по себе, а как средство сохранения нормального процесса ее функционирования в целом. Своеобразной платой за преимущества, даваемые этим механизмом, является необходимость содержания резервной бездействующей группы видов растений или животных, или людей.

Рассредоточение подсистем (видов растений, животных) по разным эколо-

гическим нишам — нормальный процесс формирования многовидовых сообществ. В ходе взаимной адаптации видов их конкуренция за ресурсы питания (взаимный шум) минимизируется и таким образом происходит стабилизация процессов обмена и состояния биоценоза. Социальным аналогом этого процесса может быть распределение предпринимателей по сферам приложения капитала и по рынкам сбыта, поиски учеными «не занятых» объектов исследования.

Частным случаем предыдущего можно считать процесс рассредоточения подсистем в географическом пространстве, а также во времени. Силы взаимодействия между объектами, приводящие к их перераспределению на поверхности Земли, аналогичны взаимодействию между видами в биоценозе. Это главным образом конкуренция за ресурсы: продукты питания, сельскохозяйственные угодья, сырье для промышленности, транспортные пути, источники энергии, трудовые ресурсы и рынки сбыта. В результате таких взаимодействий происходит рассредоточение торговых центров и населенных пунктов, которые стремятся к образованию структур, отвечающих теории А. Кристаллера–А. Леша. Так же закономерность может быть обнаружена в распределении таких объектов, как степные западины, волны песчаной ряби, деревья в лесу, гнезда птиц, норы землероев, деревни и др..

Рассредоточение во времени обуславливается теми же причинами и приводит, например, к хорошо известному в геоботанике эффекту сезонной смены аспектов растительного покрова.

Структурные перестройки систем во всех перечисленных случаях направлены на наиболее полное использование экологического или географического пространства и времени и в конечном счете на оптимизацию процессов функционирования эко- или геосистем.

4.2.4 Механизмы сохранения структуры

В тех случаях, когда инвариантом оказывается структура систем, на ее сохранение продолжают работать все рассмотренные выше механизмы стабилизации состояния. Для сохранения нормального функционирования, как можно было убедиться, структура иногда приносится в жертву: происходит замена части элементов, включая доминирующие, строение системы становится более рыхлым (связи ослабляются). Однако эти структурные перестройки относятся к определенному уровню иерархии систем и, пока их размах не слишком велик, они служат лишь укреплению и сохранению структуры систем более высокого уровня. Замены доминантов в лесном фитоценозе способствуют сохранению системы «лес». Так же происходит и в других случаях. Таким образом, с некоторыми оговорками можно считать, что сохранение состояния

системы и сохранение функционирования увеличивают одновременно время существования ее структуры.

Ниже предлагается рассмотреть семь механизмов, служащих в основном сохранению структуры систем, часто путем компенсационного изменения существенных параметров состояния. Это механизмы включения резервных программ, временного перехода в закрытое состояние, двигательная адаптация, преобразование окружающей среды, накопление резервов, симбиоз и адаптивная эволюция. Большинство из них предполагает участие регуляторов, организованных по принципу обратной связи.

Механизм включения резервных (спящих) программ характерен для систем с развитым саморегулированием: живых, социальных и технических. Сигналом для запуска программ служит сильное отклонение состояния системы от нормы, превышающее заранее определенный порог и угрожающее существованию системы. В число таких механизмов входит регенерация тканей у живых организмов, стимулирование спящих почек, использование резервов вегетативного размножения. Специализированные, так же как и неспецифические, реакции организмов на внесение инфекции, сильные раздражители представляют собой не что иное, как реализацию спящих до поры аварийных программ. Генофонд угнетенных видов-эксплерентов, незаметных и как будто лишних в фитоценозе, но способных занять место доминантов при наступлении экстремальных условий, играет роль резервных программ в экосистеме. В обществе армия, пожарная служба, скорая помощь — резервные механизмы, снабженные специальными программами на случай возникновения чрезвычайного положения.

Выше говорилось об ограничении обмена с окружающей средой. Можно считать самостоятельным механизмом временный переход в закрытое состояние, регулируемый внутренними биологическими часами и состоянием среды. Хорошо известно закрывание и открывание венчиков цветов в соответствующее время суток, переход насекомых, рептилий, амфибий и некоторых теплокровных животных в специфическое зимнее состояние с ослабленным протеканием метаболических процессов. Аналогичные процессы, например консервацию производств сугубо мирного профиля на время войны или экономического кризиса, можно обнаружить и в социальной сфере.

Двигательная адаптация как один из механизмов сохранения структуры в некоторой степени свойственна растительным организмам (гелиотропизм) и бактериям, но в основном эта способность принадлежит животным. Под двигательной адаптацией понимается активный переход, передвижение организма из среды с худшими условиями в более благоприятную обстановку. Сюда можно включить и уход от опасности, и поиски пищи, и перемещение к теплу или, наоборот, к прохладе. Для людей перемещение может быть связа-

но с поисками наилучшего психологического климата, наиболее высокооплачиваемой или престижной работы и т.п. Во всех случаях вектор движения направлен так, чтобы увести организм от критического состояния, грозящего ему физическими или моральными нарушениями.

Еще более специфичным механизмом, характерным для человека и в определенной степени для животных, является более или менее сознательное преобразование внешней среды в свою пользу. В мире животных классическими стали примеры построек термитов, муравьев и бобров, выкапывание нор, сооружение гнезд птицами. Людьюми осуществляется одомашнивание животных, распашка земли, создание искусственных проливов, островов, каналов, водохранилищ, холмов и т.п. Все эти действия направлены в конечном счете на сохранение и усиление вида, включая и вид человека разумного. Заметим, что сохранение организмов, популяций и видов как систем достигается путем включения их в новую — существующую или вновь создаваемую — экосистему высшего ранга (антропогеотехническую и др.).

Еще ярче способность сохранять себя, включаясь в комплексную систему более высокого ранга, проявляется в симбиозе, комменсализме, объединении в стаи и разновидности сообщества. Комплексные системы, состоящие из более чем одного организма, получают дополнительную жизнеспособность и устойчивость к возмущениям по сравнению с разрозненными организмами, когда между ними существует положительная обратная связь, взаимная польза. Гриб и водоросль в теле лишайника, краб и актиния на его панцире, акула и рыба-лоцман, цветы и насекомые-опылители, хвойные деревья и птицы-разносчики семян — примеры взаимного усиления объединившихся видов. Устойчивость против разрушительных внешних сил повышается и при объединении особей одного вида, например, коралловых полипов в колонии, рыб в стаи, копытных в стада и т.п. В многовидовом ценозе отношения между популяциями могут быть самые разные, не только положительные, но и отрицательные: хищничества, паразитизм и др. И тем не менее сосуществующие на одной территории организмы приспособились друг к другу и к специфической биогенной среде, таким образом, что могут самовоспроизводиться и чувствовать себя лучше, чем в любой другой среде. В итоге можно считать, что взаимодействие видов в сообществе и создаваемой ими вторичной среде в целом имеет положительный знак и повышает устойчивость каждого вида к внешним воздействиям.

Межличностные и межгрупповые отношения людей в обществе бесконечно многообразны. Они имеют самую разную природу, мотивацию и знак — от резко отрицательных до предельно положительных — и нет смысла их здесь классифицировать. Вероятно, их равнодействующая в конце концов всё-таки направлена на повышение жизнеспособности человеческой популяции в це-

лом, хотя предстоящие десятилетия могут внести в это предположение свои поправки. Но вот своеобразный комменсализм человека с домашними животными и культурными растениями, несомненно, полезен обеим сторонам. Люди обеспечивают себя более или менее постоянным источником питания, сосуществующие с ними организмы гарантируют себе продолжение рода.

Накопление резервов вещества, энергии и информации «на черный день» еще один метод повышения жизнеспособности живых систем. Нет, вероятно, ни одного живого организма, который бы не содержал в себе хотя бы минимальный запас воды и питательных веществ, позволяющий существовать в перерывах между усвоением питательных веществ. В некоторых случаях нормальный ритм существования требует создания значительных их запасов, например, для обитателей пустынь, субарктической зоны, особенно для птиц, совершающих длинные сезонные перелеты. Кроме запасов, необходимых для нормального функционирования, создаются также резервы для редких экстремальных ситуаций. Часто это запасы подкожного или внутривисцерального жира, которые утилизируются только в периоды длительных голодовок. И ходе эволюции жизнь создала также информационный резерв в форме закодированных в генах преадаптаций. Для экосистем аналогичным резервом информации служит набор видов-эксплерентов, о котором уже упоминалось выше.

Естественным информационным банком геосистем служит разнообразие сосуществующих на одной территории ландшафтов. Каждый элементарный ландшафт представляет собой самовозобновляющийся и потому способный существовать неопределенно долго «склад», в котором бережется генетическая информация о широко распространенных и уникальных видах, подвидах и географических расах животных, растений, грибов, водорослей, бактерий. Информация эта благодаря способности к избыточному размножению и распространению в пространстве может «выдаваться» соседним или даже удаленным геосистемам «по первому требованию». Таким образом, последствия природной или антропогенной катастрофы, разрушившей системы на части территории, всегда могут быть нейтрализованы путем использования генофонда окружающих уцелевших систем. Очевидно, чем выше разнообразие окружающих ландшафтов, тем выше гарантия нормального прохождения восстановительной сукцессии и реставрации климаксового сообщества. При нормальной динамике природы некоторые ландшафты играют роль убежищ или рефугиумов, в которых целые сообщества переживают неблагоприятные годы, чтобы затем распространиться на более значительную территорию или акваторию. Такими убежищами служат, например, западины в полупустыне, байрачные дубравы в степи, долинские леса в тундре, пресноводные и солоноватоводные лиманы Черного моря и др.

Многочисленны механизмы резервирования вещества, энергии и информации и в общественной сфере. Неприкосновенный запас питания у разведчиков, стратегический продуктовый и сырьевой резервы на случай войны, записанные в патентах, но не реализованные изобретения — лишь немногие примеры этого рода. Главным же резервным банком общества является разнообразие культур, аналогичное разнообразию ландшафтов в природе. Как в природе, так и в обществе разнообразие систем не только банк, склад, но и способ существования жизни. В этом их принципиальное отличие от специально созданных «стратегических резервов», не дающих эффекта в периоды нормального функционирования систем, а, наоборот, требующих затрат на свое поддерживание и возобновление.

Среди прочих механизмов сохранения структуры или, может быть, основных особенностей структуры, особняком стоит адаптационная эволюция. Здесь максимально реализуется принцип «измениться чтобы сохраниться». При изменении климатических, геоморфологических, геохимических условий жизни в каком-либо экотопе согласованность форм жизни с абиотической средой неизбежно нарушается. Если изменения совершаются не слишком быстро, то наиболее действенным средством восстановления равновесия системы становится ведущий отбор. Эволюция может внести более или менее радикальные изменения в строение и функционирование организмов, вплоть до появления признаков, характеризующих новые классы и типы живых организмов. Тем не менее можно считать, что этот процесс направлен на сохранение, причем в большей мере, чем на изменение всей ценной информации, накопленной в ходе эволюции. Условием сохранения старых структур становится их приспособление к новым условиям и добавление к ним некоторых новых механизмов. Потери информации в результате редукции некоторых ставших ненужными органов крайне незначительны. Так, при переходе к многоклеточным организмам сохранились основные особенности строения клетки, при выходе животных на сушу сохранили свои функции скелетно-мышечная, нервная, кровеносная и тому подобные системы. Биологические структуры не исчезли и тогда, когда возникла человеческая техногенная ветвь эволюции. Основная закономерность сохраняется и здесь. Историки обнаруживают немало утрат в материальной и духовной культуре человечества, однако генеральная линия общественного развития состоит в наследовании и обогащении, а не в уничтожении накопленных человечеством богатств.

4.2.5 Механизмы сохранения траектории движения

Представление об устойчивости развития введено, по-видимому, впервые биологом К. Уоддингтоном (1970). Им предложен термин «креод», обозначаю-

щий строго последовательную смену состояний, как бы трубку в пространстве состояний, по которой движется система, не отклоняясь существенно от средней линии. Классическим образцом креода стало развитие эмбриона, начиная со стадии гаметы. Относительно механизмов, контролирующих строго заданное развитие зарождающегося организма, в среде биологов до сих пор не сложилось единого мнения. Можно представить себе некую программу, записанную в генетическом коде, в которой предусмотрены все стадии развития клеточной системы и отклонение от нормы контролируется обратной связью.

Возможно, однако, другое построение программы. В ней нет записи цепочки всех будущих состояний, а команды реализуют принцип «если... то...». Достижение каждой стадии включает программу перехода к следующей стадии, все вместе они складываются в упорядоченную последовательность. Не предвещая исхода дискуссии, заметим, что, по всей видимости, второй тип программы работает в процессах сукцессионных смен растительности. В ходе восстановительных или первичных смен комплекс растительности, отвечающий данной стадии, создает оптимальные условия для более конкурентоспособных доминантов следующей стадии, чем и предопределяет переход. Лишь растительный комплекс заключительной стадии оказывается наиболее благоприятным для воспроизведения самого себя, и развитие заканчивается. Экологические свойства видов, участвующих в игре, скорректированы совместной эволюцией и записаны в хромосомах. Они обеспечивают устойчивую повторяемость процесса, если он воспроизводится в сходных условиях.

Программу устойчивого развития содержит в себе каждый действующий контур обратной связи. Чрезвычайно трудно остановить процесс кристаллизации переохлажденной воды, развитие оврага или тропического циклона. Устойчивость развития этих диссипативных структур определяется положительной обратной связью, действующей по формуле: «еще больше, чем достигнуто». С отрицательной обратной связью осуществляется так называемый эквифинальный процесс, идущий с замедлением, как при выработке почвенного профиля.

Процесс, идущий под контролем обратной связи, но не приводящий к возникновению системы с новой структурой, можно было бы назвать саморегулированием «от достигнутого». Как показано на примере растительных сукцессий, в более сложных случаях развитие системы может иметь результатом её самоотрицание и замену другой системой, причем это может происходить неоднократно. Усложнение заключается в том, что в игру вмешивается элемент случайности, выбор из некоторого набора вариантов, а траектория включает точки бифуркации. Механизмы обратной связи, саморегулирование начинают работать в таких случаях в сочетании с механизмами самооргани-

зации. При участии самоорганизации креод в определенной степени размывается, «трубка» становится шире, ход развития менее определенным. Тем не менее общий регулятор процесса и в этих случаях сохраняет его общую направленность как инвариант «от простого к сложному» или «от менее жизнеспособного к более жизнеспособному», «от менее организованного к более организованному». К таким процессам мы можем отнести биологическую эволюцию и эволюцию геосистем на нашей планете, развитие городов, развитие отдельных культур человечества и всей цивилизации как единой системы.

4.2.6 Факторы устойчивости

Наряду с механизмами устойчивости биосистем целесообразно выделять факторы устойчивости, условия, при которых эти механизмы действуют. Разные механизмы требуют неодинаковых условий. В тех случаях, когда стабильность состояний не связана с процессами саморегулирования, когда включены механизмы инерционного типа, благоприятными считаются условия спокойной, защищенной от внешних влияний среды с минимальным притоком вещества, энергии и информации. Спокойная космическая, погодная, политическая обстановка способствует стабильности инерционных систем.

Механизмы саморегулирования и особенно самоорганизации менее зависимы от состояния окружающей среды, но зато требуют избытка энергетических и вещественных ресурсов для того, чтобы поддерживать систему на удалении от термодинамического равновесия. Для активного сохранения инварианта любого вида необходимы затраты энергии и материальной структуры, организованные определенным образом. Необратимо затрачиваемая энергия непрерывно пополняется термоядерными реакциями в недрах Солнца и радиоактивным теплом Земли. Практическая неисчерпаемость материальных ресурсов создается в результате существования многочисленных циклов, возвращающих воду, газы атмосферы и многие другие важные вещества в исходное состояние после их прохождения через биосистемы. Сами по себе круговороты не обеспечивают стабильности состояний, структуры, функционирования и развития наземных систем, это достигается лишь в совокупности с регуляторами. Циклическую организацию движения вещества следует отнести не к механизмам, а к факторам устойчивости.

Для механизма накопления, названного здесь резервированием вещества, энергии и информации, важнейшим фактором следует считать разнообразие условий внешней физико-географической среды, позволяющей сконцентрировать на ограниченной территории множество видов организмов. Чтобы механизмы саморегулирования и особенно механизмы эволюционные могли проявиться, необходимо еще одно условие — не слишком большая скорость

возмущающих процессов. Если характерное время регулятора больше, чем время, за которое происходит нарастание возмущения от начала до максимальной фазы, механизм стабилизации не успевает прореагировать, инвариант системы не сохраняется.

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Литература

1. Абдеев Р.Ф. Философия информационной цивилизации. М., 1994.
2. Аптер М. Кибернетика и развитие / М. Аптер. — М., 1970.
3. Арманд А.Д. Механизмы устойчивости геосистем. — М.: Наука, 1992. — 208 с.
4. Берталанфи Л. Общая теория систем — критический обзор. // Исследование по общей теории систем: Сборник. — М.: Прогресс, 1969.
5. Бондаренко Н.И. Методология системного подхода к решению проблем: история, теория, практика. — СПб. СПбГУЭФ. 1997.
6. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. — М., 1983.
7. Голубков Е. П. Методы системного анализа при принятии управленческих решений. — М.: Знание, 1973.
8. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы. М.: Мир, 1966. — 255 с.
9. Дулов В. Г. Математическое моделирование в современном естествознании. СПб., 2001. 244 с.
10. Жакоб Ф. Регуляция активности генов / Ф. Жакоб, Ж. Моно // Регуляторные системы клетки. — М., 1964.
11. Журавлева В.В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений // Известия Алтайского гос. ун-та, 2008, Т. 57, N1, С. 43-57

12. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. — М: Наука, 1981.
13. Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. Анализ сохранятельных свойств М.: Наука, 1978, 320 с.
14. Основы теории систем и системного анализа. — С.Петербург. СПбГТУ. 2001.
15. Перегудов Ф.П., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — 1989.
16. Полуэктов, Р.А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. — СПб., 2006.
17. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. — М., 2002.
18. Родионов И.Б. Теория систем и системный анализ.
19. <http://victor-safronov.narod.ru/systems-analysis/lectures/rodionov/00.html>
20. Розен Р. Принцип оптимальности в биологии /Р. Розен. — М., 1969.
21. Торнли Дж. Г. М. Математические модели в физиологии растений / Дж. Г. М. Торнли. — Киев, 1982. (Thornley J.H.M. Mathematical models in plant physiology. London, 1976).
22. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой. — М. 1975.
23. Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. 66 с.
24. Экономическая кибернетика. Часть IV. Основы системного анализа. — Л.ЛФЭИ. 1976.
25. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. — М., 1959.

Оглавление

1	Основы моделирования	4
1.1	История моделирования как метода познания	4
1.2	Понятия «модель» и «моделирование»	5
1.3	Моделирование как метод научного познания	8
1.3.1	Цели моделирования	8
1.3.2	Принципы и аксиомы моделирования	10
1.3.3	Основные этапы построения моделей	12
1.4	Классификация моделей	14
1.5	Математические модели	18
1.5.1	Задачи математического моделирования	19
1.5.2	Основные этапы метода математического моделирования	20
1.5.3	Принципы и подходы к построению математических мо- делей	21
1.6	Моделирование в биологии	23
1.6.1	Специфика моделей живых систем	23
1.6.2	Использование моделей в биологии	26
2	Системный подход в моделировании	31
2.1	Возникновение и развитие системных представлений	31
2.2	Основные понятия теории систем	33
2.2.1	Определение понятия «система», «элемент», «внешняя среда»	33
2.2.2	Структура системы	37
2.3	Свойства систем	39
2.4	Классификация систем	42
2.5	Закономерности системной организации, лежащие в основе ис- следования и моделирования систем	49
2.5.1	Механизмы самоорганизации в сильнонеравновесных си- стемах	55
2.6	Структура системного анализа	60
2.6.1	Основные задачи системного анализа	60

2.6.2	Формирование общего и детального представления о системе	63
3	Кибернетические модели	67
3.1	Формирование и роль кибернетического подхода в научном познании	67
3.2	Информация как количественная характеристика организации и форма деятельности системы	68
3.3	Общие закономерности процессов управления и передачи информации в динамических системах	72
3.3.1	Чёрный ящик	74
3.3.2	Модель системы управления	79
3.3.3	Энергетическая классификация элементов системы управления	84
3.4	Принципы управления	85
3.5	Основные принципы управления	89
3.5.1	Принцип управления по возмущению (разомкнутые САУ)	89
3.5.2	Принцип управления по отклонению (замкнутые САУ)	91
3.5.3	Принцип комбинированного управления	94
4	Физиологическое моделирование	96
4.1	Теория управления и биосистемы	96
4.1.1	Принцип биологического эпиморфизма	100
4.1.2	Открытые системы	101
4.1.3	Пассивное и активное управление в живых системах . . .	104
4.2	Механизмы устойчивости	108
4.2.1	Устойчивость и изменчивость	108
4.2.2	Механизмы стабилизации состояния	110
4.2.3	Механизмы сохранения типа функционирования	114
4.2.4	Механизмы сохранения структуры	116
4.2.5	Механизмы сохранения траектории движения	120
4.2.6	Факторы устойчивости	122