

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана
Калужский филиал
Приборостроительный факультет
Кафедра П2-КФ

Отчет-реферат по НИРС

на тему:

"Теория управления и биосистемы"

Выполнил: студент Комиссаров А.В.

Руководитель : доцент Максимов А.В.

Калуга, 1999

Содержание

Введение

1. Основные особенности управления в биосистемах
2. Структурно-функциональный анализ биологических систем управления
 - 2.1. Рецепторы, эффекторы и устройство управления
 - 2.2. Прямая и обратная связь
 - 2.3. Пассивное и активное управление
 - 2.4. Регулирование темпов и уровней
3. Основные цели управления в биосистемах
 - 3.1. Удовлетворение метаболических потребностей
 - 3.2. Гомеостаз
 - 3.3. Адаптация
4. Высшие уровни управления в организме

Заключение

Список литературы

Введение

В толковом словаре русского языка Ожегова [3] дается следующее определение **бионики**: "раздел кибернетики, занимающийся изучением строения и жизнедеятельности организмов в целях постановки и решения новых инженерных задач". Эта отрасль науки относительно молодая, начала активно развиваться с середины пятидесятых годов двадцатого столетия. Как видно из приведенного определения, в задачи бионики входит не только структурный и функциональный анализ биосистем, но и применение полученных закономерностей и собранной информации для построения уже рукотворных, то есть технических, систем управления, призванных решать разнообразные задачи, стоящие перед обществом. Иными словами, ученые сделали вывод, что биологические системы, развивавшиеся в ходе естественной эволюции в силу объективных законов (отбора, наследственности и изменчивости), обладают рядом уникальных особенностей, которые пока не удалось реализовать в технических вычислительных и управляющих системах и которые принесли бы немалый эффект (экономический и социальный) в результате использования.

Какие же особенности биологических систем привлекают пристальное внимание исследователей от науки? Прежде всего, это **способность к адаптации**, то есть к приспособлению к изменениям факторов внешней среды. Сохранение устойчивости биосистемы (а, следовательно, и жизнестойкости) в условиях непрерывного объективного движения материального мира немислимо без этого свойства. Качество адаптации может оцениваться уровнем **гомеостаза** - свойства живой материи сохранять постоянство всех внутренних параметров системы. Заслуживают внимание и структурные аспекты реализации биологических систем, механизмы действия прямой и обратной связи, активного и пассивного управления. Немалый интерес вызывают и такие свойства живой материи, как **способность к репродукции** (т.е. воспроизводству самих себя), **ритмичность** (довольно грубым аналогом этого явления в технике, возможно, является понятие синхронизации и квантования по времени) и **развитие** (как индивидуальное - онтогенез, так и эволюционное - филогенез, см. [2]). Под развитием [2] в общем случае можно понимать такое *необратимое* движение объекта (живой материи), в ходе которого возникает новое качественное состояние этого объекта. В живом мире процессы онтогенеза сопровождаются *ростом* составляющих элементов биосистемы (т.е. увеличением размера органов вследствие интенсивного деления клеток органов и тканей), а также изменением функциональных характеристик органов и тканей, организма в целом. Репродукция, адаптация и онтогенез, как и многие другие жизненно важные свойства организма, на самом глубоком уровне рассмотрения осуществляются под управлением наследственной программы, представленной в виде строгого порядка следования нуклеотидов (аденина,

гуанина, тимина и цитозина) в молекуле ДНК. Кодирование синтезируемых организмом аминокислот осуществляется с помощью триплетов - комбинаций из трех нуклеотидов, причем данный код является избыточным (что повышает надежность кодирования).

1. Основные особенности управления в биосистемах

Под *управлением* [1, с.52] будем понимать такое воздействие одних элементов системы на другие, которое приводит систему к заданному состоянию, позволяя достичь определенных целей или нужных результатов. Согласно [4, с.19], процессы управления - это *динамические* процессы, протекающие в системах, в которых *потоки информации*, а также *решения и действия для достижения цели управления* структурно реализуются в виде замкнутых контуров, т.е. *систем с обратной связью*. Однако, как мы увидим в дальнейшем, в отдельных случаях в биологических системах достаточно эффективен и механизм управления без обратной связи (в этом случае управление сводится только к воздействию на управляемый объект).

Элементы, осуществляющие управление, относятся к управляющей (и/или задающей) части системы (это кибернетическая система организма), а элементы, испытывающие на себе управляющие воздействия, - к объектовой части системы (или, иначе говоря, к объекту управления).

Как уже отмечалось выше, к управляемым процессам относится прежде всего процесс онтогенеза. В стадии сформировавшегося организма управление сводится к поддержанию жизнедеятельности особи. При этом управление в организменных биосистемах можно рассматривать на различных уровнях. На уровне химических процессов это авторегуляция; на субклеточном и клеточном - процессы внутриклеточной регуляции; на уровне тканей и органов, систем органов и организма в целом - механизмы физиологической регуляции (управление дыханием, кровообращением и т.д.). Часть этих механизмов имеет бихевиоральный (поведенческий) характер (к ним относятся оборонительные, пищевые, половые рефлекс у животных; ВНД и психическая деятельность у людей). Нетрудно, например, заметить, что на клеточном уровне "ставится" задача обеспечения клетки всеми необходимыми веществами, удаления продуктов обмена, выработкой необходимого числа квантов энергии внутри клетки (главным образом на митохондриях, с участием синтеза и распада АТФ) для поддержания процессов деления клетки и биосинтеза необходимых белков. На уровне тканей и органов, систем органов ставится задача согласования деятельности отдельных клеток и межклеточного пространства с целью реализации единой функции (например, функции пищеварения).

Можно выделить две большие группы целей управления в биосистемах [1, с.52] :

1. сохранение вида, к которому принадлежит организм (с этим связаны способность клеток к делению, способность организмов к размножению, половые рефлексы, забота о потомстве);

2. сохранение жизнедеятельности отдельной особи в течение биологически обусловленного периода.

Говоря о процессах управления в биосистемах, обычно имеют в виду второй тип целей управления.

Заметим, что кибернетическая система далеко не у всех организмов представлена в виде отдельных органов. Так, у одноклеточных животных (например, амёб) в силу простоты организации нет специальных элементов, выполняющих функции управления. Но с усложнением структуры организма, когда появляются отдельные органы для снабжения метаболической системы (в функции которой входит обмен веществ и энергии) веществами и энергией, появляется и необходимость в специально организованной системе управления. Таблица 1 позволяет проследить влияние усложнений в метаболической системе организма на обособление и усложнение его кибернетической системы [1].

Таблица 1
Функции организма и обслуживающие их органы
(составлено по Вилли и Детье)

Уровень организации	Метаболическая система			Кибернетическая система		
	Доставка топлива и субстратов	Доставка кислорода	Выделение продуктов обмена	Рецепторы	Центральное управление	Эффекторы
Простейшие (амёба)	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Кишечно-полостные (гидра)	Рот и пассивная гастроваскулярная полость	Нет	Нет	Отдельные нервные клетки	Отдельные нервные клетки	Совратительные волокна
Плоские черви (планарии)	Рот и пассивная гастроваскулярная полость	Нет	Пламенные клетки	«Глазки», «уши»	Вентро-латеральный нерв	Реснички, мышечная система
Высшие черви (дождевые, морские); моллюски (улитки)	Активный желудочно-кишечный тракт, рот с простейшими механизмами перетирания пищи	Кровообращение (с гемоглобином)	Простейшие структуры (нефридии)	Глаза, внешние хеморецепторы	Периферическая и центральная нервная система	Нервно-мышечная система
Членистоногие (насекомые)	Желудочно-кишечный тракт, рот с челюстями	Система трахей, система кровообращения	Трубчатая система	Глаза, органы слуха, осязание, внешние хеморецепторы	Периферическая и центральная нервная система	Нервно-мышечная система, органы звуковой и химической сигнализации
Хордовые (включая человека и позвоночных)	Желудочно-кишечный тракт, пищеварительные железы, органы подготовки пищи (зубы, челюсти)	Легкие (или жаберные щели), трахеи и бронхи, кровообращение	Почки, печень, потовыделение, дыхание	Система органов чувств, интэрорецепторы, проприорецепторы	ЦНС, у человека — психика	Нервно-мышечная система, органы звуковой и химической сигнализации, железы внутренней секреции

В зависимости от степени участия специальных элементов кибернетической системы в управлении биопроцессами, различают два вида управления [1]: *внешнее* (когда регулирующее воздействие вырабатывается специальным элементом) и *встроенное* (когда цель управления достигается взаимодействием самих управляемых элементов). Обычно в биосистемах сочетаются оба эти вида управления. Так, встроенные механизмы действуют в метаболической системе организма; кроме того, у низших животных они обеспечивают и большую часть транспортных процессов (например, транспорт веществ через клеточную мембрану). Любопытно, что при проектировании технических систем пассивные (встроенные) механизмы обычно как отдельные контуры управления не выделяются. Инженер всегда проектирует внешний по отношению к объекту управления регулятор, хотя при разработке такого

регулятора обычно учитывается в наличие объекте пассивных механизмов управления (в этом случае говорят, что объект обладает свойством самовыравнивания).

2. Структурно-функциональный анализ биологических систем управления

2.1. Рецепторы, эффекторы и устройство управления

Хорошо известно, что в технических системах управления аппаратурно выделяются специальные средства, позволяющие получать входной сигнал из внешней среды, а также преобразовывать его в форму сигналов, циркулирующих в системе управления. Эти средства получили название *датчиков* и *преобразователей* (например, термодатчики, датчики теплового и радиационного излучения, фотодатчики-солнечные батареи, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и т.д.). Их аналогом в сложных биологических системах* являются специальные элементы - *рецепторы*. Рецепторы представляют собой группы клеток, воспринимающие действие раздражителей и преобразующие полученные сигналы в форму нервных импульсов определенной длительности и амплитуды, которые поступают в определенные отделы головного мозга (устройство управления). Выделяют пять основных входных каналов со стороны внешних раздражителей (у высших животных и человека): зрительный, кожно-мышечный (осозательный, тепловой), обонятельный, слуховой, вкусовой. Внутри организма также существует множество различных рецепторов, располагающихся на поверхностях органов, тканей и сосудов, например, барорецепторы (реагирующие на изменение кровяного давления в сосуде) и хеморецепторы (реагирующие на изменение концентрации отдельных биологически активных веществ).

Известно также, что в биосистемах (организмов) существуют так называемые *эффекторы*, получающие управляющее воздействие от устройства управления и преобразующие его в новую форму (механическую, форму психических процессов и т.д.) одновременно с совершением определенного действия. Их аналогом в технических системах являются датчики выходных сигналов, обратные преобразователи, а также исполнительные механизмы.

Устройство управления у высших животных (см. табл.1) представлено центральной нервной системой, располагающейся главным образом в головном и спинном мозге. Мозг, в свою очередь, представлен огромным числом нейронов, связанных между собой очень сложными и многочисленными связями. Биологическая природа связей состоит в наличии *синапсов* - мест контактов элементов нейросети (аксона и дендритов, аксона и оболочки

* Здесь и далее, без особых на то оговорок, имеются в виду внешние механизмы управления

нейрона и т.д.), а механизм их действия основан на изменении структуры оболочки пресинаптического элемента и ее ионной проницаемости в результате действия нервных электрических импульсов, происходящем при участии особого вещества - *нейромедиатора*. Как правило, "выходом" нейрона является начало аксона, где образуется выходной сигнал электрической природы, равный значению нелинейной (в общем случае) функции от суммы взвешенных входных (обычно поступающих по дендритам) воздействий ("взвешивание" производится на синапсах). В данной работе нет возможности подробно рассматривать эти аспекты, а интересующийся читатель может обратиться к соответствующим работам [5], [6], [7], одна из которых принадлежит и автору данного отчета. В работе [1, с.97-105] также приводится пример рассмотрения довольно простой биологической системы управления - нервной системы виноградной улитки.

Одной из важных особенностей восприятия и обработки как сенсорной, так и более сложной информации в биологических системах управления является естественный (в прямом смысле этого слова !) параллелизм: информация сначала воспринимается, а затем (через незначительный промежуток времени) обрабатывается **одновременно** по всем подканалам нейросети на каждом из уровней. Действительно, мы сразу воспринимаем целостную картину объекта с его цветом, формой, запахом и (возможно) издаваемыми звуками, а не по отдельности.

Отметим также, что механизмы, касающиеся высшей нервной деятельности и психики человека, в структурно-функциональном плане еще изучены очень мало (для подтверждения этой мысли см., например, [1, с.105-109] - здесь приводится пример влияния гипноза на блокирование восприятия, хотя сенсорная система продолжает работать нормально). Объяснения таких сложных психических процессов, как память, воображение, воля, эмоции также остаются в рамках гипотез.

Сигналы управления поступают от рецепторов к ЦНС и от ЦНС к эффекторам по так называемой периферической нервной системе, по проводящим нервным волокнам, также представленным совокупностью нейронов, но объединенных сравнительно небольшим числом связей.

Заметим, что все описанные в этом пункте элементы относятся к развитому активному управлению; пассивные же механизмы управления, как упоминалось выше, не имеют *специфических* структурных элементов.

2.2. Прямая и обратная связь

В зависимости от положения устройства управления по отношению к управляемому объекту в структурной цепи, в теории управления различают каналы *прямой* и *обратной* связи [1], [4]. В свою очередь, обратная связь может быть *положительной* и *отрицательной*. Главным отличием прямой связи от обратной является то, что прямая связь не учитывает степень изменения

состояния объекта после получения им управляющего воздействия, следовательно, является гораздо менее гибкой и менее распространенной. В случае обратной связи часть выходного сигнала поступает на вход системы, ослабляя (отрицательная ОС) или усиливая (положительная ОС) его.

В биологических системах зачастую связи настолько сложны, что в чистом виде нелегко выделить цепь прямой или обратной связи, так как они входят в более сложные комплексы. Исключением здесь главным образом являются рефлексы (условные и безусловные), подчиненные принципу управления с прямой связью. Примером может служить рефлекс отдергивания руки от очень горячих предметов (здесь имеет место прямая связь "терморецепторы руки → (афферентные нервные пути) → ЦНС → (эфферентные нервные пути) → мышечные эффекторы").

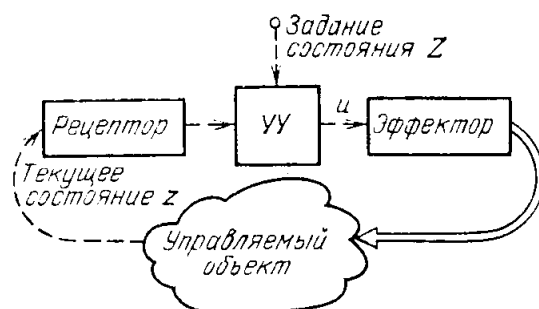


Рис. 2.1. К иллюстрации биосистем с обратной связью

На рис. 2.1 приведен один из типичных примеров биологических подсистем с наличием обратной связи*. Эта система относится к системам с обратной связью по рассогласованию (отрицательная ОС), когда производится вычитание выходного сигнала из входного и определяется величина ошибки (рассогласования), воздействующая затем вновь на объект управления. Действительно, рецептор фиксирует текущее состояние объекта z и передает соответствующее значение в управляющую часть, где оно сравнивается с желаемым значением Z (которое может генерироваться либо сохраняться самим устройством управления либо параллельно передаваться по тем же сенсорным каналам). В зависимости от величины рассогласования $\epsilon = Z - z$ вырабатывается управление u , которое подается на эффектор и изменяет z в нужном направлении до тех пор, пока не будет достигнуто равенство $Z = z$. Пример: процесс прицеливания у стрелка [1, с.62-63].

Системы, подобные рассмотренной, называют также *следящими*. В случае, когда входной сигнал такой системы не изменяется во времени, он называется *уставкой*, а сама система - *системой стабилизации* [1, 4]. Общая структурная схема следящей системы (с единичной обратной связью) приведена на рис. 2.2 а, где Р - регулятор, а О - объект управления. Заметим, что при

* На всех приводимых далее схемах при указании потоков (связей) между элементами биологической системы управления для определенности сплошной стрелкой будем обозначать вещества или энергию; пунктирной - информационные потоки; двойной стрелкой - прочие формы взаимодействия (механические перемещения, поведенческие реакции и т.д.).

моделировании в ряде случаев должны учитываться и случайные воздействия - помехи, которые могут возникать в цепи прямой, а особенно - обратной связи (см., например, рис. 2.2 б).

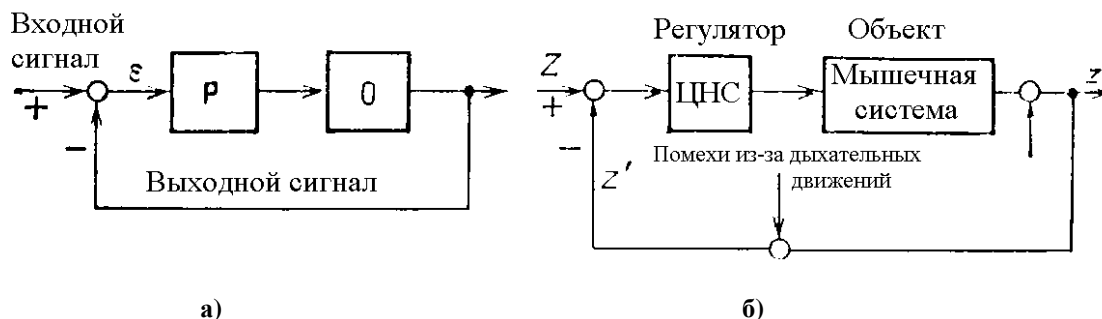


Рис. 2.2. Обобщенные структурные схемы следящих биосистем с обратной связью

Заметим, что существуют и другие типы обратной связи, например, *параметрическая обратная связь*, когда обратная связь изменяет величину какого-то параметра (например, коэффициента усиления K) в канале прямой связи: чем меньше значение сигнала в цепи обратной связи u , тем больше K , и наоборот. В процессе метаболической регуляции действует большое число прямых и обратных связей, каждая из которых является параметрической.

В литературе по теории управления, особенно популярной, часто можно прочесть, что отрицательная ОС всегда улучшает устойчивость системы, а наличие положительной обратной связи всегда лишает систему устойчивости. Вместе с тем это не всегда так ([1, с.66], [4]). Возможны случаи, когда ООС нарушает устойчивость системы (напр., когда сигнал приходит по каналу ОС с большим запаздыванием). Напротив, при малых коэффициентах усиления в канале положительной ОС устойчивость может и не нарушаться, но выходной сигнал прямого канала становится более чувствительным к изменениям входного сигнала. Возможно, это свойство положительной ОС используется в рецепторных системах, когда необходимо получить сигнал, сильно реагирующий на какие-либо изменения во внутренней среде организма [1, с.66-67], хотя четких структурных доказательств этому пока нет.

Выше уже упоминалось, что связи в организме очень сложны, что затрудняет выделение прямых и обратных связей. Например, на рис. 2.3 показано два прямых канала, abc и de . Канал ca является цепью обратной связи для канала abc , а для канала de - прямой связи (здесь ca образует участок прямого канала $dcac$). В силу этого при анализе сложных систем бывает необходимо абстрагироваться от большого числа связей, выбирая лишь одну - доминирующую, которая оказывается наиболее важной при рассмотрении конкретного процесса, т.е. подбирая соответствующую модель системы управления. Подобное моделирование удобно осуществлять с использованием ЭВМ.

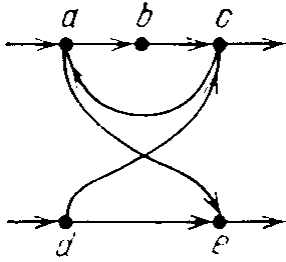


Рис. 2.3. К иллюстрации трудностей, возникающих при использовании понятия обратной связи

2.3. Пассивное и активное управление

Как уже отмечалось выше, в пассивных (встроенных) механизмах нет специальных регулирующих органов, а роль управляющих сигналов играют сами переменные состояния. Особенностью пассивных систем является то, что они при своем функционировании не требуют расхода метаболической энергии (запасенной в макроэргических связях АТФ).

Одним из воплощением встроенного управления стал известный принцип Ле Шателье, состоящий в том, что любая стационарная система, предоставленная самой себе, при воздействии внешнего возмущения стремится ослабить результат этого воздействия. Проиллюстрируем действие этого принципа на примере важнейшего для жизнедеятельности клетки процесса диффузии веществ через мембрану [1].

Пример 2.1. Рассмотрим систему "эндоплазма клетки - внешняя среда" (см. рис. 2.4). Как известно, скорость и направление диффузии зависят от градиента концентрации вещества между внутренней и наружной стороной клеточной мембраны. Чем больше разница в концентрациях вещества, тем выше модуль этого градиента; направление диффузии совпадает с направлением вектора градиента концентрации: в сторону меньшей концентрации.

Введем обозначения: y_i - усредненное количество вещества i , поступающего в эндоплазму клетки через ее мембрану за единицу времени; w_i - усредненное количество вещества i , покидающего эндоплазму клетки через ее мембрану за единицу времени; x_i и v_i - соответственно количества вещества i в эндоплазме клетки и во внешней среде, а x_i^s - соответствующее установившееся значение; k - коэффициент диффузии, показывающий ее эффективность (для эффективной диффузии он должен быть достаточно большим, много большим единицы).

В установившемся режиме количество вещества, покидающее клетку, и количество этого же вещества, поступающее в нее, равны между собой. Так как входной поток равен

$$y_i = k(v_i - x_i), \quad (2.1)$$

в установившемся режиме выходной поток также будет равен

$$w_i = k(v_i - x_i^s), \quad (2.2)$$

откуда находим зависимость стационарного уровня вещества i в эндоплазме клетки от параметров метаболической системы и внешней среды:

$$x_i^s = v_i - \frac{w_i}{k}. \quad (2.2.1)$$

Как видно из полученного выражения, возрастание оттока во внешнюю среду по каким-либо причинам вещества (например, если это клетка многоклеточного организма, вследствие перераспределения метаболической нагрузки между тканями) окажет тем меньшее воздействие на изменение концентрации этого вещества в эндоплазме, чем большее значение имеет коэффициент k (в идеальном случае, при $k \rightarrow \infty$, наблюдается полный клеточный гомеостаз в

отношении данного вещества и данной клетки). Вместе с тем изменение параметров внешней среды (v_i) приведет к неизбежному изменению концентрации вещества в эндоплазме, так как оно ничем не скомпенсировано. Ниже приведена упрощенная схема рассмотренного процесса:

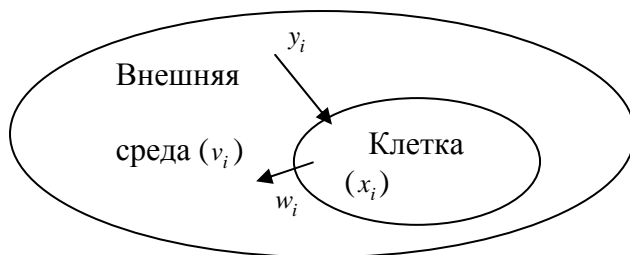


Рис. 2.4. К пояснению механизма клеточного диффузионного транспорта

На примере диффузии мы показали, что если в живой системе существует встроенное управление, то круг возмущений, которое система может демпфировать, является ограниченным. В частности, *такой механизм не в состоянии компенсировать результаты ухудшения окружающих условий*, но он оказывается достаточно эффективным в случае демпфирования возмущений, вызванных изменениями в интенсивности процессов метаболизма.

В любом случае работа пассивного механизма связана с той или иной степенью изменения концентрации веществ во внутренней среде, что исключает возможность постоянства ее состава.

Другим известным примером, иллюстрирующим пассивное управление, является механизм снабжения клетки кислородом [1, с.71-72], см. также схему на рис. 2.5. В общем случае, при анализе обменных процессов оперируют понятиями "источник", "компармент" (ячейка, например, клетка) и "сток". В приведенном выше примере (2.1) внешняя среда может рассматриваться и как источник (когда рассматривается поток u_i), и как сток (когда рассматривается поток w_i).

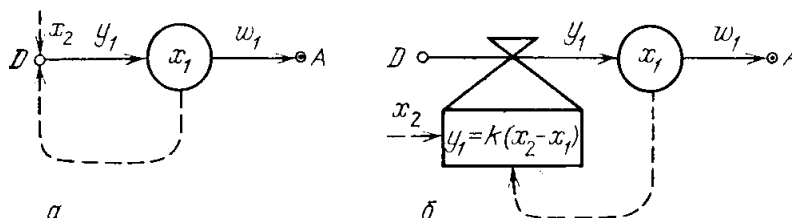


Рис. 2.5. Функциональные схемы пассивного механизма диффузионного транспорта: а) - без обозначения закона регуляции; б) - с обозначением закона регуляции*. Д - источник, А - сток, x_1 - переменная состояния компармента, x_2 - переменная состояния внешней по отношению к компарменту среды

Вторым недостатком пассивных механизмов является то, что они "маломощны", то есть их возможностей хватает на обеспечение лишь самых малых объемов живой материи веществами или энергией - органелл клетки, отдельных клеток или одноклеточных организмов. Но, несмотря на отмеченные недостатки, именно пассивные механизмы обеспечивают баланс многих веществ в организме животных. Вместе с тем в ходе филогенеза (см. табл. 1), увеличения массы и объемов тела животного появляются и активные механизмы (напр., перенос кислорода движущимся потоком крови), т.к. одни лишь пассивные механизмы уже не в состоянии обеспечить возросшие

* Обозначения заимствованы у автора работы [1]

потребности организма (напр., поверхность диффузии кислорода растет медленнее, чем нуждающийся в дыхании объем тела).

Как уже упоминалось, в случае действия активных механизмов специальные органы совершают полезную работу, при этом расходуя АТФ (аденозинтрифосфорную кислоту). Активные механизмы требуют для своего описания множества специфических физиологических переменных. Они очень разнообразны по своей природе: включают химические, физические, механические и электрические величины. Приведем примеры этих переменных для процесса снабжения тканей кислородом: это минутный объем дыхания, частота сердечных сокращений, сопротивление сосудистого русла и т.д. В дальнейшем будем обозначать их через u_i , $i = \overline{1, N}$, где N - число переменных. Можно записать, что

$$u_i = F_i(\mathbf{X}, \mathbf{V}), \quad (2.3)$$

где $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ и $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_l)$ - вектора переменных состояния системы (ее компартментов) и окружающей среды соответственно [1].

Анализируя процессы активного и пассивного управления, можно сделать следующие выводы [1]:

1. при пассивном управлении регуляция скорости обмена осуществляется за счет изменения самих значений переменных состояния компартментов системы, а при активном такая регуляция осуществляется за счет изменения переменных u_i ;
2. пассивная регуляция в случае сложных метаболических процессов имеет место лишь на последних этапах транспортной цепочки (на уровне клеточных компартментов); все предыдущие этапы обеспечиваются активной регуляцией;
3. как правило, активные механизмы первых этапов процесса ставят в наиболее благоприятные условия пассивные механизмы последующих этапов, обеспечивая довольно высокое значение концентрации веществ;
4. пассивные механизмы являются своего рода "последним резервом" системы управления: даже если активные механизмы исчерпают свои ресурсы, градиент концентрации все же сможет поддерживаться на достаточно высоком уровне за счет уменьшения значения переменной состояния системы (т.е. снижения концентрации в пределах компартмента);
5. наличие же активных механизмов позволяет сохранять относительное постоянство переменных состояния системы, что обеспечивает гомеостаз.

2.4. Регулирование темпов и уровней

Как было показано выше, процессы управления в организме (биохимическая и физиологическая регуляция) должны поддерживать стационарное неравновесное состояние метаболической системы [1], т.е. постоянное уравнивание скоростей притока и потребления необходимых веществ. При этом можно заметить, что одна часть управляющих звеньев (со множеством прямых и обратных связей) связана с регуляцией скоростей (темпов) протекания процессов, а другая - с регуляцией уровней (концентраций) веществ и энергии в отдельных подсистемах организма.

В частности, можно заметить, что работа всех пассивных (встроенных) механизмов направлена на то, чтобы уравнивать между собой темпы притока и оттока вещества: скорости зависимых потоков корректируются так, чтобы следовать за изменениями скоростей независимых (ведущих) потоков. Регулирование уровней также имеет важное значение, т.к., например, повышение температуры тела выше определенного значения сделало бы невозможной работу целого ряда структур организма; повышение уровня глюкозы в крови привело бы к нарушениям метаболизма. Отметим, что подобное разделение типов регулирования весьма условно, т.к. своей конечной целью регулирование уровня имеет обеспечение требуемой скорости протекания процессов. Кроме того, все различия этих типов регулирования сводится к различиям в физической природе задающего (входного) сигнала.

Пример 2.2. Рассмотрим систему в виде простой цепочки, состоящей из двух компартментов с пассивным регулированием скорости доставки вещества (см. рис. 2.6).

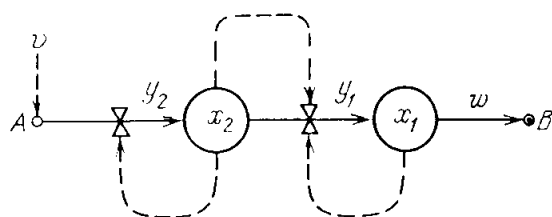


Рис. 2.6. Два компартмента с пассивным управлением скоростью притока

Скорость потока вещества по цепочке задается темпом его потребления в ведущем стоке B , а поступает вещество из физиологического источника A , который забирает это вещество из окружающей среды с уровнем v . Посредством диффузии вещество перемещается сначала в компартмент x_2 , затем - в x_1 , и потребляется со скоростью w . Скорости потоков y_1 и y_2 зависят от градиентов соответствующих участков:

$$\begin{aligned} y_1 &= k_1(x_2 - x_1), \\ y_2 &= k_2(v - x_2). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Перерисуем эту схему с использованием общепринятых обозначений структурных элементов системы автоматического регулирования:

а) считаем, что целью управления является регуляция темпа процесса (см. рис. 2.7). Тогда для компартмента x_1 задающим сигналом является темп оттока w , а регулируемым - темп поступления y_1 . Для компартмента x_2 задающим сигналом является сигнал y_1 , а регулируемым - темп y_2 . Регулятором в обоих случаях является уровень вещества в компартменте, а объектом регулирования - скорость притока. Поэтому уравнения (2.4) - уравнения регулируемого объекта. Запишем уравнения регулятора:

$$\frac{dx_1}{dt} = y_1 - w \text{ (для первого контура),}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = y_2 - y_1 \text{ (для второго контура);}$$
(2.5)

Заметим, что в этом случае регулятор выполняет операцию интегрирования сигнала.

б) теперь считаем, что целью управления является регуляция уровня вещества (см. рис. 2.8).

В этом случае задающим сигналом является желаемая (или заданная) величина уровня, называемая *уставкой*, а регулируемый сигнал - фактический уровень. В этом случае объект управления описывается уравнениями (2.4) и (2.5), а для регулятора можно записать уравнение

$$u = K(\bar{x} - x_1). \tag{2.6}$$

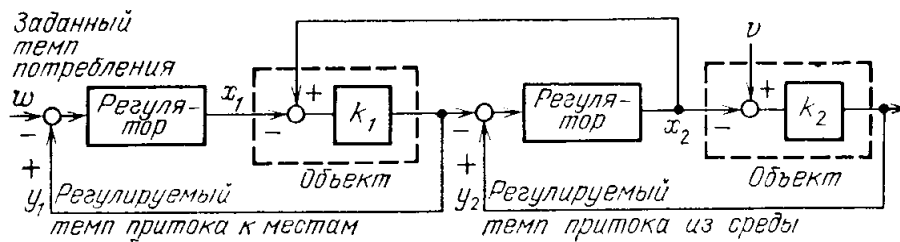


Рис. 2.7. Представление биосистемы для случая, когда в качестве цели управления исследователь рассматривает поддержание необходимой скорости доставки вещества

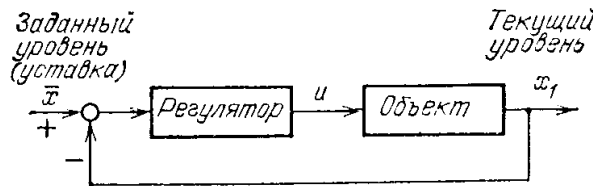


Рис. 2.8. Представление биосистемы для случая, когда в качестве цели управления исследователь рассматривает поддержание требуемого уровня расходуемого в ней вещества

Естественно, при моделировании системы, в зависимости от цели исследования, можно воспользоваться либо одним, либо другим вариантом модели, но не обоими вариантами одновременно. Ведь разные варианты неизбежно будут противоречить друг другу - один и тот же сигнал может выступать в одной схеме (см., например, рис. 2.7, сигнал x_1) как регулирующей, а в другой (см., например, рис. 2.8, сигнал x_1) - как регулируемый, следовательно, в последнем случае именно его постоянство важнее всего.

В действительности во многих случаях сигналы типа уровень играют в организме двойственную роль: с одной стороны, они являются регуляторами темпов протекания процессов - в пассивных механизмах, с другой - сами могут быть регулируемым сигналом - в активных механизмах; цель активной регуляции здесь часто может быть сформулирована как поддержание постоянства уровня.

Из всего рассмотренного ранее можно сделать вывод: **целью управления всегда является регуляция темпов внутриклеточных жизненных процессов, т.е. удовлетворение метаболических потребностей организма.**

Эта цель может быть обеспечена простым путем, если будет обеспечиваться гомеостаз, т.е. постоянство внутренней среды.

3. Основные цели управления в биосистемах

3.1. Удовлетворение метаболических потребностей

Под метаболическими потребностями организма понимаются, в первую очередь, потребности в веществах и энергии, которые необходимы организму для многих жизненно важных процессов, таких как биосинтез белка, липидов, генерация нервных импульсов и т.д.

Метаболическая система организма последовательно переходит из одного неравновесного стационарного состояния в другое. Неравновесным это состояние является потому, что любое изменение потребностей организма и вызывает нарушение равновесия, что активизирует пассивные и особенно активные механизмы так, что ведомые физиологические и биохимические источники изменяют свои скорости в нужную сторону, уравнивая изменения в потреблении.

Признаком неравновесного стационарного состояния является выполнение для любого компартмента системы с переменной (характеристикой) $x_i, i = 1, 2, \dots, m$, равенства

$$\frac{dx_i}{dt} = 0. \quad (3.1)$$

Это состояние может сохраняться только в том случае, если

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} w_j = - \sum_{k=1}^N q_{ik} y_k. \quad (3.2)$$

В данной формуле w_j и y_k - входные и выходные потоки компартмента (соответственно j и k); p_{ij} и q_{ik} показывают, какая часть потока от компартмента j (k) поступает к компартменту i . Последнее соотношение удобно записать в матричной форме:

$$[\mathbf{P}] \cdot \bar{\mathbf{w}} = -[\mathbf{Q}] \cdot \bar{\mathbf{y}}. \quad (3.2.1)$$

Равенство (3.2) (или эквивалентное ему (3.2.1)) иногда называют условием удовлетворения потребностей [1].

Заметим, однако, что в живых организмах всегда существуют определенные **запасы** разных веществ (жиров, гликогена, кислорода, воды и т.д.). Следовательно, разница между притоком и оттоком вещества из некоторого компартмента может быть ликвидирована не сразу, а с задержкой: за счет расходования запаса. Уровень же запасов отслеживается неточно, например, самое нежесткое условие выглядит так: $x_k > 0$ (чтобы сохранялся хоть какой-то ненулевой уровень запаса).

Зададимся теперь вопросом: всегда ли эквивалентны понятия "удовлетворение потребностей" и "достижение стационарного равновесия" ?

Дело в том, что биохимические процессы в организме сводятся к совокупности сложных химических реакций, различающихся по скорости протекания. Следовательно, и стационарное неравновесие достигается в таких системах не сразу, а за истекшее время могут измениться и потребности. Поэтому два указанных выше понятия можно считать эквивалентными только для части достаточно быстрых процессов в организме (это транспортные и энергетические процессы).

Проиллюстрируем указанные выше особенности удовлетворения метаболических потребностей на примере удовлетворения потребностей организма в углеводах.

На рис. 3.1 показана упрощенная иллюстрация углеводного обмена, а на рис. 3.2 изображена эквивалентная схема управления в виде двух следящих систем с общим сумматором.

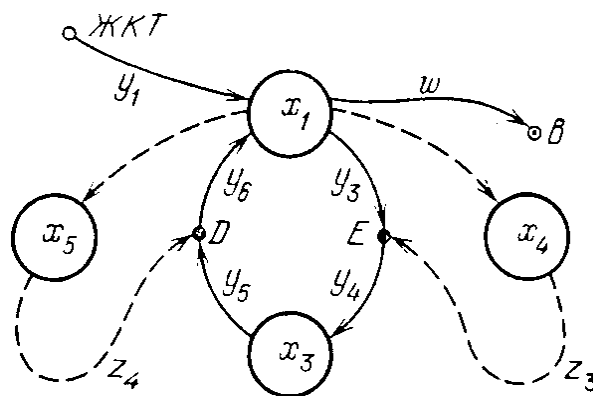


Рис. 3.1. Упрощенная функциональная схема углеводного обмена

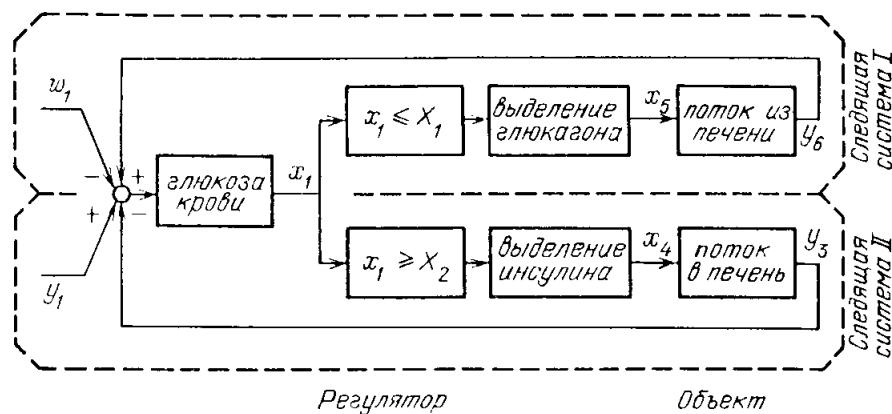


Рис. 3.2. Структурная схема биологической СУ, иллюстрирующая процессы управления в системе углеводного обмена

Рассмотрим следующие основные компартменты: x_1 - кровь; x_3 - печень; x_4 - инсулин; x_5 - глюкагон; источник - ЖКТ (желудочно-кишечный тракт); сток В - ткани и органы, где расходуется глюкоза. В соответствии с рис. 3.3, после приема пищи в крови на небольшой промежуток времени происходит увеличение уровня глюкозы. Далее глюкоза начинает потребляться тканями, вследствие чего уменьшается ее концентрация в крови. Пока уровень глюкозы в крови очень высокий (превышает пороговое значение X_2 , см. рис. 3.2), ее

излишки запасаются в печени под воздействием инсулина, превращающего глюкозу в животный крахмал - гликоген (следящая система II). Напротив, как только уровень глюкозы в крови снижается ниже критического значения, под воздействием глюкагона гликоген гидролизуется до глюкозы, и по цепи положительной обратной связи данный поток поступает на сумматор (рис. 3.2). В режиме работы "натошак", т.е. когда поток из ЖКТ $y_1 \cong 0$, в работу включается только первая следящая система. Равновесное состояние в данной системе достигается при некотором значении x_1 , несколько меньшем порогового.

Аналогичные приведенным рассуждения можно провести и для процессов вывода из организма побочных продуктов обмена. Соответствующие физиологические стоки образуют потоки этих веществ, направленные из внутренней среды вовне. Скорости этих потоков регулируются так, чтобы уравновесить независимые потоки упомянутых веществ в их ведущих источниках.

3.2. Гомеостаз

Как уже неоднократно отмечалось выше, гомеостаз - это способность внутренней среды организма поддерживать постоянство своих параметров. Большое значение постоянству внутренней среды как необходимому условию протекания обменных процессов придавали такие известные физиологи, как Клод Бернар, И.М.Сеченов (1860 г.). Сам термин "гомеостазис" появился впервые в трудах американского физиолога Уолтера Кеннона (в книге "Мудрость тела") в 1932 г. Гомеостаз определялся именно как *относительное* постоянство среды, т.е. то, что мы ранее называли неравновесным стационарным состоянием. Однако в 1960-70 гг., в связи с бурным развитием кибернетики, многие исследователи сильно преувеличивали степень постоянства при гомеостазе. [1, с.110-111]

Современная же биохимия полагает [1, там же], что специальные механизмы существуют для поддержания многих (холестерин, глюкоза, липиды, мочевина и др.) веществ, но не для всех. Так, для веществ, которые в принципе не синтезируются в организме (десять "незаменимых" аминокислот, витамины и т.п.), существует только один способ "регуляции" - их регулярное поступление с пищей.

Так как гомеостаз поддерживается не только за счет пассивных, но и (главным образом) за счет активных механизмов, на поддержание гомеостаза тратится немало энергии. Поэтому "гомеостатируется" лишь часть переменных состояния организма (обязательно гомеостатируются показатели обменных процессов в нервных клетках, в высокоспециализированных клетках внутренних органов и т.д.). Гомеостаз внутренней среды организма облегчает нагрузку на пассивные механизмы обмена для клеток, так как сужает диапазон условий, воздействующих со стороны внеклеточного пространства (внутреннего для организма, но внешнего по отношению к клетке) на клетку.

Задачу гомеостаза можно свести к задаче демпфирования как внешних воздействий на биосистему, так и внутренних возмущений (например, воздействия продуктов отмирания собственных клеток).

Количественно и качественно гомеостаз может быть описан с помощью графиков, называемых *гомеостатическими кривыми*. Так, на рис. 3.3 приведен пример такой кривой (зависимость внутренней переменной состояния от переменной среды).

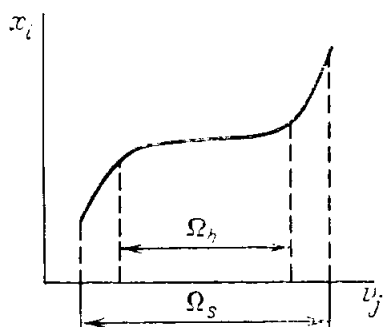


Рис. 3.3. Идеализированная гомеостатическая кривая: Ω_h - область гомеостаза; Ω_s - область стационарности

Как видно из рисунка, почти горизонтальный участок кривой соответствует поддержанию гомеостаза за счет эффективной работы активных механизмов; при повышении возмущения выше некоторого значения происходит истощение ресурсов активных механизмов.

Качество гомеостаза переменной состояния i при j -м воздействии может оцениваться, например, по величине частной производной

$$\sigma_{ij} = \left| \frac{\partial \bar{x}_i}{\partial \bar{v}_j} \right|, \quad (3.3)$$

где \bar{x}_i и \bar{v}_j - стационарные значения уровней вещества в компартментах системы и во внешней среде соответственно. В идеале это значение должно равняться нулю, но фактически гомеостаз считается приемлемым, если выполняется неравенство

$$\sigma_{ij} \ll \sigma_{ij}^0, \quad (3.4)$$

где σ_{ij}^0 - некоторое значение этой величины вне области гомеостаза.

Обычно в регуляции каждой из важнейших переменных организма принимает участие несколько механизмов управления.

На рис. 3.4 приведена общая схема взаимодействия активных и пассивных механизмов при гомеостазе (см. [1, с.121-122]). Рассогласование скоростей ведущих (скорость стока) и ведомых (скорость притока вещества в компартмент u) процессов "включает" одновременно и пассивные, и активные механизмы управления скоростями ведомых процессов. Но активные механизмы реагируют быстрее, следовательно, переменные x , выполняющие функции пассивных регуляторов, не успевают изменить свои значения. Таким образом, гомеостаз сохраняется во всем диапазоне линейности Ω_h .

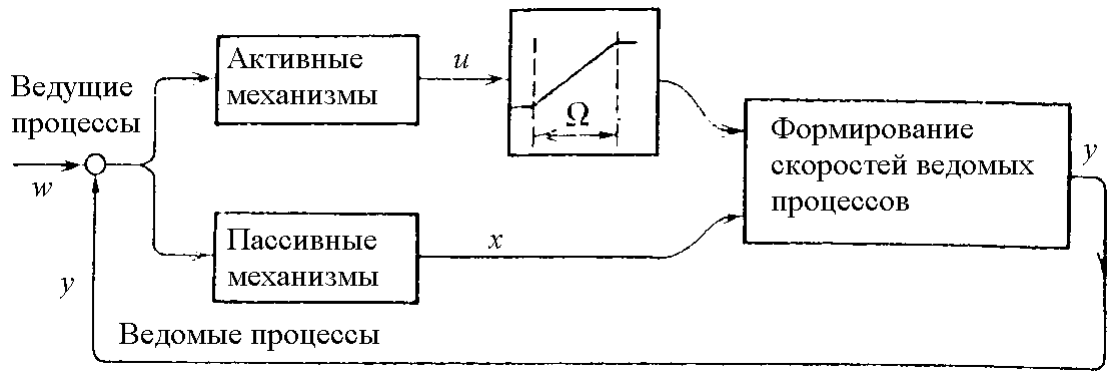


Рис. 3.4. Общая схема взаимодействия активных и пассивных механизмов в организме

На рис. 3.5, а и б, показаны два варианта представления схемы управления транспортом кислорода [1]: а) - система управления, цель которой - удовлетворение потребностей в кислороде (НЭ - нелинейный элемент); б) - система стабилизации, цель которой - поддержание уровня кислорода в системе.

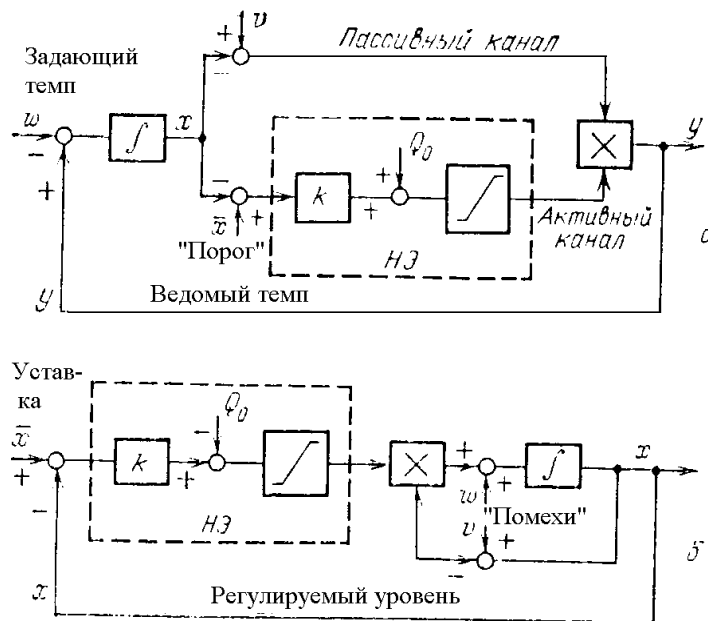


Рис. 3.5. Два варианта представления схемы управления транспортом кислорода

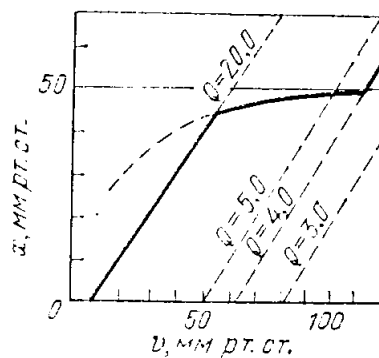


Рис. 3.6. Гомеостатическая кривая в случае кислородного транспорта

Рассмотрим вкратце механизм поддержания гомеостаза на примере кислородного транспорта.

Пассивный механизм управления, описываемый уравнением

$$y = k(v - x), \quad (3.5)$$

где v - концентрация O_2 во вдыхаемом воздухе, а x - во внутренней среде организма (в тканях организма), может вызвать определенное нарушение гомеостаза в случае, если величина v меняется, хотя чем больше будет коэффициент усиления k , тем в меньшей степени будет нарушаться гомеостаз.

Но в организме действуют и активные механизмы, поддерживающие постоянный уровень кислорода в тканях (за счет регуляции частоты и амплитуды сокращений сердца, сосудов, колебаний диафрагмы и т.д.), что создает, к примеру, дополнительный кровоток. Следовательно, поток крови через ткани будет равен

$$Q = Q_0 + \Delta Q = Q_0 + K_A(\bar{x} - x), \quad (3.6)$$

где Q_0 - некоторое установившееся значение кровотока, когда нет необходимости изменять его за счет активной регуляции; K_A - коэффициент усиления активного управления. Отметим, что кровоток в организме должен поддерживаться в некотором диапазоне: $Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$. Даже в самых экстремальных условиях он не может превысить предельной наибольшей величины, так как возможности сердечно-сосудистой системы ограничены. Поэтому можно записать, что

$$K_A = \begin{cases} 0, Q \geq Q_{\max}; \\ K, Q_{\min} < Q < Q_{\max}; \\ 0, Q \leq Q_{\min}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Скорость поступления кислорода в ткани организма с учетом активных и пассивных механизмов будет равна (с учетом ограничений (3.7))

$$y = K_A k(\bar{x} - x)(v - x) \quad (3.8)$$

Для стационарного режима, когда переменная x перестает изменяться и принимает значение $x = x^s$, а $y = w$ (т.е. скорости притока вещества в ткани и их оттока равны) на основании (3.8) имеем:

$$w = K_A k(\bar{x} - x^s)(v - x^s) \quad (3.9)$$

На рис. 3.6 приведена гомеостатическая кривая для следующих значений параметров (кровоток будем измерять в литрах в минуту):

$Q_{\min} = 4,0$; $Q_{\max} = 20,0$; $Q_0 = 5,0$; $v = 100,0$; $\bar{x} = 52,5$;

$K = 2,0$; $k = 1,0$; $w = 250,0$.

Заметим, что пороговое значение \bar{x} , а также уровень ν будем измерять в мм.рт.ст. Пунктирная *кривая* линия соответствует идеализированному случаю, когда отсутствуют ограничения, подобные (3.7). Как правило, активные механизмы мощнее пассивных, то есть $K \gg k$. Заметим, что асимптотой переменной состояния при гомеостазе является величина $x=50$, немного меньшая порогового значения, но с определенной долей погрешности можно считать, что асимптотическое значение совпадает с уставкой $\bar{x} = 52,5$.

3.3. Адаптация

Свойство адаптации является одним из важнейших свойств, присущих живым организмам, так как оно позволяет им выживать и давать потомство в постоянно изменяющихся условиях существования. Анализ механизмов адаптации особенно важен при построении автоматических технических систем управления нового поколения - так называемых адаптивных систем.

В физиологии под адаптацией понимается *любое приспособление организмов к условиям их обитания, направленное на поддержание их функционального состояния и гомеостаза* [1]. Напомним, что предпосылкой способности к адаптации организмов является его генетический код. Происходивший в результате филогенеза естественный отбор позволяет говорить о том, что генетический код данного организма обеспечивает способность организма к адаптации *при определенном диапазоне изменения воздействий окружающей среды*.

Здесь мы остановимся на адаптации отдельного организма. Различают *процесс адаптации* (своеобразный аналог переходного процесса в теории управления) и *состояние адаптированности* (аналог установившегося состояния в ТАУ). Признаком состояния адаптированности является сохранение гомеостаза на всех структурно-системных уровнях организма. Иными словами, в состоянии адаптированности (если, конечно, вызвавшее адаптацию воздействие не продолжает изменяться) независимые темпы w возвращаются почти к исходным (преадаптационным) значениям, а переменные состояния x практически остаются неизменными. При полной адаптации все системы организма сохраняют постоянство переменных состояния, а адаптационные возможности системы не уменьшаются. Помимо полной адаптации различают еще и неполную, когда в некоторых системах организма переменные состояния x претерпевают изменения, а общие показатели жизнедеятельности сохраняются при неполных адаптационных возможностях.

Во время процесса адаптации, как правило, происходит увеличение темпов метаболизма, т.е. потребления веществ и энергии. Этот факт можно объяснить тем (см. рис. 3.7), что изменение переменных внешней среды ν влечет изменение темпов ведомых процессов y . При прочих равных условиях это приводит к нарушению гомеостаза, что "включает" как активные, так и пассивные механизмы регуляции. Реагируют прежде всего наиболее мощные активные механизмы, которые в процессе работы вызывают дополнительный расход энергии Δw . Начиная с некоторого момента, однако, в силу внутренних

связей между переменными x_i , происходит их более медленное по сравнению с работой активных механизмов изменение. Вследствие этого интенсивность работы активных механизмов понижается, а пассивных - растет. Уменьшается и величина дополнительных энергозатрат, а текущие потребности постепенно уменьшаются до исходного значения.

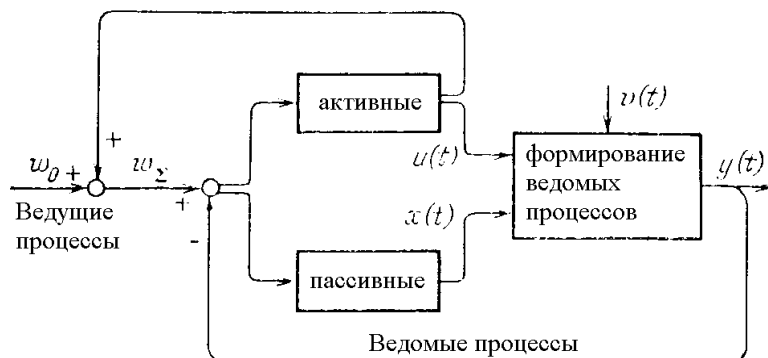


Рис. 3.7. Упрощенная схема процесса адаптации

Заметим, что при этом новые значения переменных состояния отдельных систем организма могут отличаться от предадаптационных значений, т.е. гомеостаз в общем случае является довольно относительным. Как правило, изменяются те переменные, постоянство которых обеспечивать организму не требуется.

Бывают и отдельные случаи, когда потребности организма могут вырасти или уменьшиться по сравнению с исходными даже после завершения переходного процесса. Например, при сильном охлаждении, когда резко возрастают темпы теплопотерь в окружающую среду, организм вынужден поддерживать более высокие темпы теплопродукции и после окончания переходного процесса. Наоборот, при полете людей в космос в условиях невесомости снижаются метаболические потребности их организмов.

4. Высшие уровни управления в биосистемах

До сих пор, когда мы рассматривали процессы регуляции (например, метаболического обмена) в организме, используя модель, состоящую из истоков, стоков, компартментов и потоков, то не интересовались тем, каким образом, откуда берется исток, считая, что он либо существует неизменным, либо начинает меняться, что влечет необходимость адаптации. Да и саму адаптацию мы рассмотрели на уровне такой же модели.

Вместе с тем, ресурсы (те самые истоки) внешней среды распределены неравномерно, следовательно, для удовлетворения метаболических потребностей организму приходится проявлять активность, совершая определенные действия (такие, например, как перемещение в пространстве, совершение определенных движений, поведенческих актов). "Принять" животному или человеку то или иное решение "заставляет" его центральная

нервная система, подобная деятельность которой и относится к высшим уровням управления. На данном этапе под воздействием ЦНС решаются многие задачи взаимодействия организма и окружающей среды, связанные с поддержанием жизни особи и вида, к которому данная особь относится: поиск источников питания и способов завладеть пищей, борьба с врагами, организация безопасного жилища, поиск брачного партнера и т.д. Все эти действия связаны с определенными поведенческими актами, обеспечивающими активное взаимодействие организма с окружающей средой. Приведем в виде таблицы сравнение постановки задачи и ее решения в случае технической системы управления и биологической системы управления (на высших уровнях управления).

Этап	Содержание	Техническая СУ	Биологическая СУ
1. Постановка цели управления	Определение конечного состояния, в которое она должна перейти по завершении процесса управления	Для межзвездного корабля цель управления - координаты точки космического пространства, в которой корабль должен оказаться в нужный момент времени	Для лисы, преследующей зайца(-ев), цель управления - совмещение координат лисы и зайца в какой-то момент времени
2. Определение множества допустимых решений задачи (МДР)	Вводятся ограничения на решение задачи	Ограничения - по запасу топлива, по перегрузкам, по времени управления	Хватит ли лисе сил, чтобы догнать зайца ?
3. Учет факторов внешней среды при прогнозе движения	Определяется состояние окруж. среды по допустимым траекториям	Например, первый участок траектории проходит в атмосфере, а последующие - в вакууме, но при возможных встречах с метеоритами	Учет возможности встречи с охотником
4. Выбор "оптимального" решения	Сравнение вариантов и выбор наилучшего с учетом ограничений	Критерии качества - время достижения цели, расход ресурсов...	Критерий "оптимальности", например,- выбор самого короткого пути, поимка самого крупного зайца и избежание встречи с охотником
5. Реализация выбранного варианта		Как правило, с использованием ОС в техн. САУ	ОС в биологич. системе

Нетрудно видеть, что комплекс задач управления в случае биосистем существенно шире, чем в случае технических систем управления:

1. Все стоящие задачи организм должен решать непрерывно, его нельзя "отключить";
2. Часто задачи ставятся перед организмом одновременно, следовательно, происходит "выбор" наиболее приоритетных, "выяснение возможности" параллельного выполнения. Заметим, однако, что сложные современные программно-аппаратные комплексы с соответствующими операционными системами позволяют осуществлять сортировку задач по приоритетам и распределение ресурсов системы во времени, а также распараллеливание по отдельным экземплярам ресурса (например, элементарного процессора). Но здесь используются довольно ограниченные алгоритмы, затрудняющие "адаптацию" системы и ограничивающие ее универсальность. В случае же биологических систем нет заранее очерченных алгоритмов поведения в той или иной ситуации, хотя потенциальные возможности ЦНС и организма в целом зависят от структуры генетического кода, являющегося, как было сказано выше, универсальным и избыточным.

Заключение

Подведем итог настоящей работы. В ходе ее были проанализированы основные кибернетические аспекты организации биологических систем, проблемы и особенности использования понятий прямой и обратной связи, целей управления, выбора надлежащей структурной схемы биологической САУ для проведения анализа. Показано, что применять термины из теории технических САУ к анализу биосистем можно, но с определенными оговорками.

Рассмотрение биосистем проводилось на разных уровнях организации. При рассмотрении внутренних механизмов регуляции обменных процессов использовалась модель с использованием понятий "компармент", "источник", "сток" и "поток", широко используемая и автором [1]. Был сделан вывод, что в процессе адаптации участвуют как активные, так и пассивные механизмы регуляции, а в поддержании гомеостаза ведущая роль принадлежит активным механизмам. Были рассмотрены и особенности этих механизмов, а также объективная необходимость появления активных механизмов в ходе филогенеза. Была рассмотрена общая схема регуляции метаболических процессов.

Был проведен обзор высших уровней управления, роль ЦНС в регуляции жизненных процессов через поведение. Автором упомянуты аспекты структурной и функциональной организации нервной системы, освещен круг проблем, связанных с подобными исследованиями, даны ссылки на источники, содержащие информацию строения и функционирования живых нейронных сетей.

Литература

1. Новосельцев В.Н. Организм в мире техники: кибернетический аспект. - М., Наука, 1989.
2. Мамонтов С.Г. Биология: Справ. издание.- М., Высшая школа, 1991.
3. Толковый словарь русского языка Ожегова С.И. Электронная поисковая система в Internet:
http://www.agama.ru/oz_demo.htm
4. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М., издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993.
5. Комиссаров А.В. Отчет по НИРС на тему "Нейронные сети и их моделирование". КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра П2-КФ. Калуга, 1997.
6. Гальперин С.И. Физиология человека и животных. М., Высшая школа, 1977.
7. Беркинблит М.Б. Нейронные сети. М., МИРОС., 1993.