

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра медико-биологической техники

М.В. ПЕЙЧЕВА

# **БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2006

УДК 606:61(07)  
ББК 30.16я7  
П 24

Рецензент  
д.м.н., профессор Канюков В.Н.

**П 24**      **Пейчева, М.В.**  
    **Биотехнические системы как объекты исследования: методические указания / М.В. Пейчева. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 22 с.**

Методические указания содержат основные сведения о биотехнических системах.

Предназначены для студентов специальности 200402.65 «Инженерное дело в медико-биологической практике» при изучении дисциплины «Основы биотехнических систем».

© Пейчева М.В., 2006  
© ГОУ ОГУ, 2006

## Содержание

1 Системный подход к изучению объектов живой и неживой природы.....	4
2 Классификация систем.....	6
3 Системные аспекты управления.....	8
4 Биологические системы. Рассмотрение организма с позиций системного анализа.....	13
5 Функциональные системы организма.....	17
Список использованных источников.....	20

# 1 Системный подход к изучению объектов живой и неживой природы

Современная медицина и биология широко используют измерения и различную измерительную и регистрирующую технику для решения самых разнообразных задач по исследованию организма. Необходимым условием эффективности этих исследований является оснащение лечебных и научных учреждений совершенными методами исследования и современным оборудованием.

При проведении биологических и медицинских исследований используется большой арсенал методов и средств, предназначенных для измерения различных медико-биологических показателей, а также для регистрации и анализа физиологических процессов, протекающих в организме. Результаты исследований представляются в виде набора чисел и графиков, отражающих состояние биологического объекта во время проведения исследований.

Приступая к изучению неизвестного объекта, исследователь стремится рассмотреть его с разных точек зрения, проанализировать с нескольких позиций. Для этого ему приходится использовать различные методы и способы получения и обработки информации от объекта, формирования информативных показателей и алгоритмов принятия решения. Так как на процесс исследования влияет большое количество трудно учитываемых факторов, то всегда необходимо оценить соответствие полученных количественных и качественных характеристик действительному состоянию объекта исследования. При изучении биологического объекта оценка этого соответствия становится особенно важной, так как в зависимости от состояния определяется дальнейший ход исследований, диагностики, терапевтических или хирургических воздействий.

Изучение особенностей биологического объекта связано с преодолением значительных трудностей. Это объясняется, с одной стороны, необычайной сложностью организма, представляющего собой совокупность многих взаимосвязанных физиологических систем, а с другой, несовершенством методов исследования и математического аппарата, не позволяющего адекватно описать такую совокупность. В связи с этим биологический объект исследования должен характеризоваться с более общих методологических позиций. В качестве одной из них может выступать системный подход, являющийся методологией научного исследования и практического освоения сложноорганизованного объекта. В этом случае на первое место ставится не анализ составных частей объекта как таковых, а его характеристика как определенного целого, раскрытие механизмов и связей, обеспечивающих целостность объекта.

Основными задачами теории систем можно считать:

- разработку средств и способов представления исследуемых объектов как систем;
- построение обобщенных моделей системы и моделей различных свойств системы;
- исследование концептуальной структуры системных теорий.

Под системными исследованиями следует понимать совокупность таких современных научных и технических проблем, которые при всем их разнообра-

зии сходны в понимании и, рассмотрении, исследуемых объектов, как систем, т.е. «как множеств взаимосвязанных элементов, выступающих как единое целое» (В.Н. Садовский).

При анализе методов медико-биологических исследований необходимо обращать особое внимание на их метрологический аспект, связанный с повышением точности и достоверности получаемых измерений. Биологический объект характеризуется огромным количеством показателей – статических и динамических, количественных и качественных, измеряемых прямыми, а чаще косвенными методами. Любой процесс измерения, связанный с подключением датчика информации, можно характеризовать методическими погрешностями, специфическими для того или иного метода. Например, контактные датчики, взаимодействуя с объектом исследования, искажают изучаемые процессы а сам объект влияет на характеристики датчика. Эти источники погрешностей могут привести к значительным ошибкам при измерении медико-биологических показателей или регистрации физиологических процессов. Анализ подобных методических погрешностей, оценка их доли в общей погрешности исследования невозможны без знания особенностей биологической системы.

Еще большее значение приобретает знание особенностей организации биологических систем при разработке (синтезе) биотехнических систем, сочетающих в едином контуре управления биологические и технические звенья. Эффективность подобных систем полностью определяется тем, насколько точно будут согласованы характеристики этих звеньев, обеспечена единая информационная среда, в которой происходит взаимодействие разнородных звеньев, и соблюден принцип адекватности при выборе средств воздействия. С позиций общей теории систем синтез биотехнических систем можно отнести к одному из видов прикладных системных теорий наряду с системотехникой, инженерной психологией, эргономикой и т. д., где соблюдение принципов системного проектирования является неременным условием для достижения высокого качества синтеза.

## 2 Классификация систем

Любой закон, любая наука в целом есть обобщенная функциональная модель действительности, способная предсказывать поведение реальных объектов в определенном диапазоне условий. Построение моделей, использование функциональных схем и математических соотношений требует точной характеристики и строгого определения понятий.

Одно из самых общих понятий, применяемых при описании объектов, – понятие система. В литературе встречается более 40 различных определений этого понятия. Наиболее общим и в то же время достаточно простым является следующее определение: система – совокупность элементов, определенным образом связанных и взаимодействующих между собой для выполнения заданных целевых функций.

Дадим также еще одно определение этого понятия с позиций теоретико-множественного подхода. В этом случае система определяется как некоторый класс множеств, по формуле (1):

$$S = \{M_s^i, L_s^j, K_s^k\}, \quad (1)$$

где  $M_s^i$  – подкласс множеств элементов системы S;  
 $L_s^j$  – подкласс множеств, образующихся в результате деления элементов системы S на подэлементы;  
 $K_s^k$  – подкласс таких множеств, в которые рассматриваемая система S сама входит в качестве элемента.

Любая система характеризуется наличием входов и выходов, элементным составом и структурой, набором параметров, описывающих ее внутреннее состояние, и законом поведения, связывающим выходные сигналы (эффекты, ответы, реакции) с входными (причиной, стимулом, воздействием, возмущением) (рисунок 1).

Рисунок 1– Общая схема системы

Закон поведения системы в общем случае выражается системой нелинейных уравнений вида

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_r), \quad (2)$$

где  $y_j$  – выходной сигнал на  $j$ -м выходе системы;  $j = \overline{1, m}$ ;  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные сигналы;  
 $u_1, u_2, \dots, u_r$  – определяющие параметры системы;  
 $f_j$  – функционал, связывающий сигнал на  $j$ -м выходе с входными сигналами и определяющими параметрами.

Реальные системы трудно объединить в какие-то естественные группы, так как они имеют разную природу и назначение. Тем не менее, можно выделить наиболее общие признаки, позволяющие классифицировать системы и разделить методы их изучения. К этим признакам относятся сложность систем, использование различных типов входов и выходов, характеристика элементов и типов связей между ними и т. д.

По сложности можно выделить три класса динамических систем:

- простые, состоящие из небольшого количества элементов характеризующиеся простым динамическим поведением;
- сложные, структура которых отличается разветвленностью, разнообразием связей, но поддается точному описанию;
- очень сложные системы, точно и подробно описать которые нельзя.

По характеру поведения различают детерминированные и стохастические системы. Для детерминированных систем точно известен закон поведения, для стохастических можно определить вероятность того или иного ее состояния, той или иной реакции.

Другой принцип классификации систем основан на введении понятий об информационных, энергетических и вещественных входах и выходах, причем под «информацией» в этом случае понимаются сведения, сигналы об окружающем мире, которые воспринимаются системой, или сигналы, которыми обменивается данная система с другими. В этой классификации различают:

- информируемые системы, имеющие хотя бы один информационный вход;
- информирующие системы, имеющие хотя бы один информационный выход;
- информационные системы, имеющие некоторое количество информационных входов и выходов.

Приведенные примеры возможных подходов к классификации не являются строго формализованными и в определенной степени произвольны. В то же время они выявляют основные теоретические задачи, связанные с описанием систем и стоящие перед исследователями.

### 3 Системные аспекты управления

Формирование процессов, определяющих поведение системы, составляет задачу управления. Если развитие предполагает изменение морфологии, расширение функций, изменение информационного описания, то при управлении остаются неизменными информационное и морфологическое описания в отношении элементного состава.

Управление, осуществляемое со стороны другой системы или среды, называется внешним, а управление внутри системы со стороны одной из подсистем – внутренним. Различают управляющую и управляемую подсистемы (системы). Часто их функции воздействия друг на друга весьма сложно переплетаются, особенно в биологических и биотехнических системах. Характерной особенностью управляемой системы является способность изменять поведение, местоположение, переходить в новое состояние под влиянием различных управляющих воздействий.

Свойством управляемости обладают не любые системы. Необходимым условием наличия в системе хотя бы потенциальной возможности управляемости является ее организованность, т. е. наличие определенной структуры и целесообразного состава и наличие связей между элементами.

Управление связано с переработкой информации. Для осуществления управления необходима связь между управляющей и управляемой системами (подсистемами). Такая связь может быть вещественной, энергетической и информационной, при этом для сложных, высокоорганизованных систем характерны информационные связи. При необходимости управляющие подсистемы корректируют режим управляемых подсистем путем передачи управляющей информации. Последняя поступает на управляемую систему через эфферентные связи и эффекторную подсистему (эффекторные элементы), а осведомительная – через афферентные связи и рецепторную подсистему (рецепторные элементы). В сложных системах процесс переработки информации является многоступенчатым, включающим, например, сбор информации, кодирование, отбор и классификацию, передачу, декодирование, отображение, хранение и т. д.

Управление предопределено целевой функцией системы. Зависимость управляющего действия от состояния системы и среды называется законом управления. Его можно выразить в математической, логической или лингвистической формах, способ его формирования зависит от типа и свойств системы. Законы управления могут быть чрезвычайно разнообразны, их сложность изменяется в широких пределах. Вместе с тем самые сложные законы управления могут быть представлены последовательностью сравнительно простых единичных фактов, фактов переработки «порций» информации, эта последовательность определяет алгоритм управления. Время от поступления очередной порции информации до поступления управляющей команды называется длительностью цикла управления.

Управляющая информация может формироваться по ходу изменений ситуации на основании апостериорной информации о внешней среде и внутрен-



нем состоянии системы или заранее, когда на основании априорной информации предсказывается развитие ситуации. Возможен смешанный способ формирования управляющих сигналов. Реализация управленческих функций может осуществляться, в виде централизованного и децентрализованного управления. Существуют также и промежуточные (смешанные) типы управления. Для биологических систем характерна также иерархическая структура управления, в которой управленческая информация передается «ступенчато» от верхних (центральных) подсистем к нижним (подчиненным), причем возможно несколько «ступенек» передачи информации, соответствующих нескольким разнородным уровням организации внутри данной системы.

В обеспечении высокой эффективности управления значительная роль отводится обратным связям. Управляющая система непрерывно контролирует управляемую систему и вырабатывает команды управления в соответствии с состоянием управляемой системы и целью управления. Без этого невозможны процессы адаптации и самоорганизации, немислимо существование живых систем. Особая способность систем формировать целенаправленное самостоятельное поведение, включающее предвидение, осуществляется при помощи обратных связей.

Обратные связи можно разделить на положительную и отрицательную. Положительная обратная связь увеличивает чувствительность системы, отрицательная способствует устойчивости ее. Совместное их действие может оказать сильное формирующее влияние на процессы для поддержания их уровня при случайных внешних воздействиях. Исследование и описание комбинированных обратных связей представляет сложную задачу, особенно при их большом количестве, когда даже выявить их трудно.

Качество управления – один из наиболее важных критериев оценки сложных систем, включая и биотехнические системы. Все факторы, влияющие на качество управления, можно разделить на группы, связанные с качеством критериев управления, с частотой циклов управления, с качеством осведомительной информации и с алгоритмами управления.

Качество управления можно выяснить путем сравнительной оценки нескольких вариантов, сравнивая их показатели эффективности. Допустим, что система работает в двух режимах: А с эффективностью  $R_A$  и В с эффективностью  $R_B$ . Тогда можно рассмотреть абсолютную эффективность по формуле (3):

$$\Delta R = R_A - R_B, \quad (3)$$

где  $\Delta R$  – абсолютная эффективность;  
 $R_A$  – эффективность системы А;  
 $R_B$  – эффективность системы В.

Если для идеальной системы показатель эффективности такой, что выше величина  $R$  не существует, тогда оценка может стать абсолютной:

$$\Delta R_{\text{упр}} = R_{\text{упр}}^0 - R_A. \quad (4)$$

где  $R_{\text{упр}}^0$  – показатель эффективности;  
 $\Delta R_{\text{упр}}$  – абсолютная эффективность;

Таким способом можно оценивать качество управления применительно к элементам системы, например, операторам (их подготовленность и соответствие решаемой задаче). Величина  $R_{\text{упр}}^0$  в этом случае может быть вычислена, либо измерена на моделях (например, на тренажно-моделирующем комплексе без включения человека в контур управления). Затем, включая в контур управления человека, можно получить реальное значение эффективности  $R^*$ . Тогда находим абсолютную оценку которая показывает, насколько снижается качество управления при переходе к реальной системе (5).

$$\Delta R = R_{\text{упр}}^0 - R^*, \quad (5)$$

где  $R^*$  – реальное значение эффективности.

Показатель  $\Delta R$  становится также инструментом для оценки влияния того или иного мероприятия по организации деятельности человека, влияния смены алгоритма управления, изменения программы подготовки операторов и т. д.

Еще одной функциональной характеристикой является помехозащищенность. Как уже отмечалось, система функционирует в условиях воздействия на нее различных внешних и внутренних факторов. Обычно рассматриваются некоторые нормальные (типичные) условия работы системы. В этих условиях функционирование системы называется невозмущенным. Естественно, что реальные условия, как правило, отличаются от нормальных. Помехой называются внешние или внутренние факторы, которые изменяют параметры системы  $u_1, u_2, \dots, u_r$  в сторону  $u^*_1, u^*_2, \dots, u^*_r$ . Изменения под действием помех для  $i$ -го параметра можно выразить по формуле (5):

$$u_i^* = u_i^0 + \Delta u_i, \quad (5)$$

где  $u_i^*$  – возмущенное значение параметра  $u_i$ ;  
 $u_i^0$  – значение параметра  $u_i$  в нормальных условиях.  
 $\Delta u_i$  – абсолютное значение  $u_i$

Аналогично для помех, воздействующих на внешние условия среды, получают следующие оценки, по формуле (6):

$$\beta_j^* = \beta_j^0 + \Delta \beta_j, \quad (6)$$

где  $\beta_i^*$  – возмущенное значение параметра  $u_i$ ;  
 $\beta_j^0$  – параметры среды при нормальных условиях.  
 $\Delta u_i$  – абсолютное значение  $u_i$

Устойчивость – функциональная характеристика сложной системы. Под устойчивостью функционирования системы понимается ее способность сохранять требуемые свойства в условиях воздействия возмущений. Практически это понятие применимо по отношению к определенному виду возмущений определенной численной характеристике системы. При этом чрезвычайно важно выде-

лить области устойчивости системы, т. е. пределы изменения ее параметров, в которых система выполняет свои целевые функции достаточно эффективно.

Следующей функциональной характеристикой системы является степень ее сложности. Обычно сложность системы определяется интуитивно, однако при синтезе систем и особенно их сравнительном анализе на разных стадиях разработки необходимы количественные критерии для оценки этой характеристики. Без этого невозможен, например, машинный синтез систем.

Пусть имеем  $n$  типов элементов системы. Для каждого типа оценим сложность  $i$ -го элемента числом  $T_i$ . Тогда обобщенная сложность системы  $T$ , состоящей из элементов со сложностью  $T_i$ , ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) будет рассчитываться по формуле (7):

$$T = \sum_{i=1}^n T_i k_i, \quad (7)$$

где  $T$  – сложность системы;  
 $T_i$  – сложность  $i$ -го элемента;  
 $k_i$  – количество элементов  $i$ -го типа, входящих в систему.

Можно ввести также оценку сложности связей и рассчитать относительное число реализованных связей по формуле (8):

$$\alpha = \frac{M^*}{N(N-1)}. \quad (8)$$

где  $M^*$  – система;  
 $N$  – связи системы  $M$ .

С помощью этого коэффициента общая сложность системы может быть формально выражена формулой (9):

$$T = (1 + v \alpha) \sum_{i=1}^n T_i k_i, \quad (9)$$

где  $v$  – коэффициент, учитывающий сложность связей по сравнению со сложностью элементов системы.

Рассмотренные функциональные характеристики сложных систем позволяют оценить последние с разных сторон и дают основу для их объективного сопоставления и сравнения.

Несмотря на обилие литературы, посвященной разработке методологии системного подхода, общепринятая точка зрения на сущность системного анализа пока еще отсутствует. Поэтому рассмотрим сводную характеристику всех его основных этапов и принципов.

Системный подход предполагает разносторонний анализ объекта, но при этом могут быть выделены три основных этапа, три «плоскости» системного исследования:

- 1) изучение степени организованности объекта как сложной системы. При этом анализируются элементный состав, связи и структура системы при фиксировании ее состояния в некоторый момент времени (морфологическое описание моментного состояния);

- 2) изучение законов функционирования, описывающих поведение системы в условиях реального существования, и анализ возможных погрешностей в ее поведении, накопления ошибок, функциональное и информационное описание);
- 3) изучение пути развития объекта, его происхождения и перспектив дальнейшего существования (генетико-прогностическое описание).

На первом этапе можно выделить две задачи: выяснение состава и свойств элементов подсистем, включенных в систему (элементный анализ) и определение того, как они между собой связаны (анализ связей и типа структуры).

При составлении морфологического описания решается несколько основных задач:

- выявление взаимосвязей элементов, которые придают объекту целостность и порождают новые свойства, отсутствующие у каждого элемента в отдельности;
- изучение характера взаимосвязей элементов, выделение высших и низших уровней организации, при этом определяют центральные и соподчиненные элементы, наличие прямых и обратных связей, определяется тип структуры и конфигурация и т. д.;
- сравнение данной системы с другими в плане их близости, сходства и различия, что позволяет выявлять общие законы организации сложных систем.

На втором этапе изучаемый объект рассматривается как элемент (подсистема) более обширной и сложной метасистемы в которой он выполняет определенные функции. Такой объект постоянно взаимодействует с окружающей средой, так или иначе, реагируя на ее воздействия. Однако процессы, происходящие внутри объекта, не могут однозначно определяться только внешними воздействиями. Изменения, которые претерпевает объект, вызываются переплетением как внешних, так и внутренних факторов, причем, чем сложнее объект, тем в большей мере характер этих изменений определяется присущими ему внутренними закономерностями.

Сам по себе системный анализ не может дать содержательного знания об изучаемых объектах, он лишь направляет процесс исследования, задает круг проблем, которые должны быть решены. Последовательность рассмотренных этапов системного анализа также не однозначна и зависит от типа объекта и целей исследования. Поэтому продуктивное применение системного анализа возможно лишь в сочетании со всем арсеналом методов и средств, выработанных в той или иной конкретной области знания, к которой относится изучаемый объект. При этом каждый из рассмотренных этапов системного анализа имеет свои методы исследования, которые, взаимно дополняя друг друга, помогают всестороннему изучению объекта.

## 4 Биологические системы. Рассмотрение организма с позиций системного анализа

Рассмотрение организма с позиций системного анализа может дать более ясное представление о нем, как об эволюционно возникшей, весьма сложно организованной и развивающейся системы, характеризующейся, как и всякая система, своими специфическими особенностями.

Рассмотрим некоторые принципы организации управления, действующие в биологических системах. Анализ результатов физиологических исследований позволяет легко обнаружить иерархическую организацию этих подсистем.

Центральная нервная система, состоящая из головного и спинного мозга, играет руководящую роль как в отношении взаимодействия организма с внешним миром, так и по отношению ко всем происходящим в организме сложнейшим процессам. Основным механизмом нервной деятельности – прием сигналов из внутренней и внешней среды, преобразование их в нервные импульсы, передача импульсов в нервные центры головного мозга, где они анализируются, и выработка ответной реакции, которая осуществляется при помощи исполнительных органов.

Органы и подсистемы организма, управляемые нервными центрами, решают отдельные частные задачи регулирования в соответствии со своей сложно организованной внутренней структурой. Так, каждый орган как макросистема представляет собой совокупность клеток или групп клеток с многочисленными связями между ними. Каждая клетка – сама по себе сложная система, в которой при детальном исследовании можно выделить большое количество разных более или менее автономных подсистем (иерархичность морфологического описания).

Иерархичность структуры организма приводит к тому, что взаимодействие нервной системы с органами и подсистемами строится на принципе последовательности уровней, через которые проходят управляющие сигналы к исполнительным механизмам регуляции (рисунок 1). Такое многоуровневое управление более экономично, чем жестко централизованное. Оно сохраняет принцип централизации управления со стороны внешних уровней при относительной независимости (автономности) функционирования низших уровней (подсистем).

Рисунок 2 – Упрощенная схема многоуровневого управления

Выполнение принципа наименьшего взаимодействия не означает полной независимости функциональных систем друг от друга. Каждый орган, имея двустороннюю связь с центральной нервной системой, может влиять на ее состояние, а через ее посредство – на выполнение функций другими органами и подсистемами. Например, раздражение механорецепторов сердечно-сосудистой системы может рефлекторно вызвать изменение возбудимости центров голов-

ного мозга, управляющих мышечной деятельностью, дыханием, деятельностью почек и т. д. Однако в условиях «физиологического покоя» вся деятельность организма точно согласована, а незначительное влияние на каждую подсистему со стороны других подсистем как раз и помогает системе организма сохранить эту согласованность функционирования.

При сильных внешних воздействиях на организм принцип наименьшего взаимодействия нарушается, возникают эффекты непосредственного возмущающего воздействия одних подсистем на другие – эффекты иерархических влияний, доминирования конкурентных отношений. Примерами таких отношений могут служить взаимоотношения систем терморегуляции и кровообращения в условиях переохлаждения организма, систем регуляции осмотического давления и количества жидкости в организме в условиях сильного обезвоживания, преимущество в кровоснабжении конечностей, кожи и т. д.

Попадая в экстремальные условия, организм стремится поддержать постоянство наиболее важных показателей в ущерб менее ответственным, т. е. действует принцип поддержания постоянства внутренней среды. Здесь имеется в виду относительное постоянство, при котором значения показателей не выходят за физиологические пределы. Разделение существенных показателей по важности и, следовательно, доминирование одних систем регуляции над другими определяется их значимостью для выживания организма в целом.

Принципиальное значение для понимания процессов функционирования организма имеет вопрос о величинах существенных показателей, т. е. о так называемых уставках, об опорных сигналах для систем регулирования.

Данные физиологических исследований указывают на определенную связь между существенными показателями организма. Например, артериальное давление крови зависит от тонуса сосудов, скорости кровотока, минутного объема кровообращения, кислотности (рН крови) и т. д., на газовый состав крови влияют частота и глубина дыхания, рН крови, ее температура, количество и свойства эритроцитов и т. д., тонус сосудов определяется активностью метаболических процессов, гидродинамическими показателями кровообращения, клеточными процессами в сосудистой стенке; на интенсивность клеточного окисления оказывают влияние давление кислорода и кислотность крови, температура клетки, концентрация ферментов, окисляющихся субстратов и продуктов окисления и т. д. Таким образом, каждый показатель (выходной сигнал системы регулирования) оказывается прямо или косвенно входным сигналом для других систем организма, т. е. влияет на величины выходных сигналов (других показателей) всей системы.

Описание такого единого комплекса подсистем, объяснение взаимосвязи между существенными показателями организма в настоящее время ведется на основе нескольких подходов.

В соответствии с концепцией гомеостаза, организм может находиться в равновесии только тогда, когда каждая входящая в его состав подсистема также находится в равновесном состоянии. При этом величины выходных сигналов каждый из подсистем определяются величинами выходных сигналов всех остальных. Уставка является концентрированным выражением всей совокупно-

сти воздействий организма на рассматриваемую подсистему. Следовательно, отклонение одного из показателей от нормы не всегда свидетельствует о нарушении в той подсистеме, которая им управляет.

В последнее время получила развитие концепция, объясняющая постоянство показателей, на основе представления о совокупности подсистем организма в виде системы нелинейных колебательных структур (осцилляторов) различной природы.

Любая подсистема обеспечивает выполнение функции с помощью некоторого набора механизмов регуляции, причем можно выделить центральные и локальные (местные) механизмы. Центральные механизмы откликаются на обобщенные запросы всего организма, локальные учитывают потребность отдельных органов и подсистем, выбирают способ выполнения задания, полученного через каналы управления центрального механизма. Так, при изменении общего кислородного баланса изменяется режим вентиляции легких, изменение уровня гликемии крови заставляет печень изменять секрецию глюкозы, повышение уровня метаболизма приводит к увеличению производительности сердца и т. д. В то же время потребление органами кислорода, глюкозы, индивидуальный уровень кровотока определяются локальными механизмами.

Центральные и локальные механизмы действуют совместно и согласованно. И хотя основная роль в управлении той иной функцией принадлежит центральным механизмам, деятельность некоторых локальных механизмов может быть определяющей для нормального функционирования всего организма. Например, расстройство локальных механизмов регуляции коронарного кровотока вызывает повреждение всей системы кровообращения, расстройство локальных механизмов регуляции почечного кровотока нарушает функцию фильтрации и выведения шлаков из организма и т. д.

Взаимодействие центральных и локальных механизмов регуляции еще раз подтверждает вывод о том, что в организации выполнения функций у высших организмов принимают участие сразу несколько уровней управления. При этом регулирующий фактор может передаваться разными путями – нервным, гормональным, гидродинамическим, биохимическим и т. д.

Действующие в организме подсистемы регулирования отличаются большим разнообразием физико-химических свойств, причем каждому уровню управления свойственны свои способы передачи информации о величинах управляющих сигналов.

Скорость протекания процессов при разных способах передачи сигналов различна. Поэтому для одновременного функционирования всех уровней целостного организма характерно наличие процессов, протекающих в разных временных масштабах (имеющих разные длительности переходных процессов) – принцип разновременности процессов. Так, время запаздывания в передаче управляющих сигналов нервным путем достигает 0,3 секунды, химическим путем – 3 секунды, нейрогуморальные и гормональные факторы запаздывают соответственно на 3 и 7 минут, а жизненные процессы и процессы деградации 15 и 70 лет. Здесь первые четыре временных показателя (от 0,3 с до 7 мин) характерны для так называемых гомеостатических механизмов регулирования пара-

метров внутренней среды организма, остальные (от нескольких дней до десятков лет) соответствуют адаптивным процессам и генетическим эффектам.

Подсистемы регулирования, представленные в организме, разнообразны также по принципам управления. В основе организации управления лежат принципы обратной связи, управление по отклонению, по возмущению, прогнозирование (форпостное управление). Физиологам хорошо известно наличие у организма моторной синергии, т. е. четкой согласованности движений частей тела при решении моторных задач, например дыхательная синергия, согласованное движение рук и ног при ходьбе, беге, плавании и т. д. Одни синергии врожденные, другие вырабатываются в процессе обучения. Сложные движения выполняются путем последовательного чередования различных синергий – своеобразных блоков, из которых складывается движение. Группировка параметров системы, имеющей много степеней свободы, в специализированные блоки (ансамбли) является, по-видимому, одним из общих и эффективных методов управления такими системами; это приводит к уменьшению числа независимых параметров и делает управление более экономичным. Образование специализированных блоков широко используется организмом не только при выполнении разнообразных задач управления, но и при обработке информации в центральной нервной системе (например, синергизм в работе нейронов).

Организму часто приходится решать сложные задачи в ограниченное время, в то же время скорость многих биологических процессов сравнительно невелика. Это противоречие устраняется способностью организма к преднастройке и прогнозированию ситуации на ближайшее будущее. Такая способность проявляется как при выполнении двигательных задач, так и в поведенческих актах.

Большое значение при организации управления в живых системах имеет способность организма к обучению (обучаемость), т. е. формированию определенных подпрограмм (правил, алгоритмов) повторения действий, особенно в случаях, когда одна и та же задача решается многократно. Это выражается и в выработке условных рефлексов на раздражители, в формировании моторных синергий при освоении новых движений, и в формировании различных умений, приемов выполнения задач, и в творческой деятельности мозга, и т. д.



## 5 Функциональные системы организма

Особенности организации и функционирования живых систем характеризует необычайную сложность процессов управления, обеспечивающих высокую надежность этих. Эффективность процессов целенаправленного управления в значительной степени зависит от постоянства внутренней среды организма, которое необходимо поддерживать непрерывно с учетом характера внешних воздействий. Динамическая организация биологических механизмов и процессов, которая обеспечивает организму приспособительный эффект, точно соответствующий требованиям данного момента, рассматривается как некоторая функциональная система. Понятие о функциональной системе было впервые сформулировано в 1935 году академиком П.К. Анохиным.

Общая схема функциональной системы приведена на рисунке 2. В ней можно выделить два основных элемента. Центральным элементом является конечный полезный эффект (КПЭ) (общая устойчивость организма или определенная величина некоторой физиологической константы), так как от состояния и колебаний будет зависеть в данный момент динамическое поведение всей функциональной системы. Конечный полезный эффект отличается относительным консерватизмом и способен изменяться в допустимых в аспекте существования организма пределах. Другой элемент – рецепторные подсистемы (РП), точно приспособленные к параметрам (физическим или химическим) данного конечного эффекта. Рецепторные подсистемы являются еще более консервативным образованием, характеризующимся относительно высоким постоянством параметров (чувствительности, разрешающей способности, динамического диапазона и т. д.). Внутренняя среда (ВС) организма имеет тенденцию к значительным флуктуациям, которые отражаются в флуктуациях конечного эффекта. Эти флуктуации вместе с параметрами внешней среды (ПС) воспринимаются рецепторными подсистемами и через афферентные связи поступают в центральную нервную систему (ЦНС). Туда же поступает информация от подсистем органов чувств (ПОЧ). Центральная нервная система в соответствии с поступающей информацией определяет целевую функцию (ЦФ), на основе которой «включает» или «выключает» различные механизмы (средства достижения приспособительного результата) – эффекторные подсистемы (ЭП), поддерживающие постоянство отдельных показателей внутренней среды и обеспечивающие тем самым афферентные связи центральной нервной системы с конечным полезным эффектом. Количество таких механизмов может быть очень велико, что обеспечивает их весьма широкую пластичность и взаимозаменяемость. Внешняя среда (С) может оказывать непосредственное влияние на отдельные подсистемы организма на любом уровне организации: это может привести к изменению свойств и параметров этих подсистем и даже нарушить выполнение целевой функции.

Рисунок 3 – Общая схема функциональной системы

В качестве примера можно рассмотреть систему внешнего дыхания (рисунок 3). Цель ее функционирования (конечный полезный эффект) – поддержание парциального давления кислорода и углекислого газа ( $pO_2-pCO_2$ ) в крови. В качестве рецепторной подсистемы (РП) выступают тканевые интероцепторы, измеряющие расход кислорода, окислительные процессы в тканях, артериальные хеморецепторы, измеряющие парциальное давление кислорода в крови легочной артерии и аорты, и медуллярные хеморецепторы, расположенные в области дыхательного центра, оценивающие потребление кислорода в системе кровоснабжения головного мозга. Приспособительный эффект может достигаться в результате подключения различных механизмов регуляции: вегетативной нервной системы, системы двигательных нервов, системы кровообращения и т. д. Система двигательных нервов, управляющая работой дыхательной мускулатуры, может влиять на конечный полезный эффект путем изменения глубины и частоты дыхания. Система кровообращения отзывается на изменения конечного эффекта изменениями ударного объема сердца, частоты пульса, скорости кровотока, на которую, в свою очередь, влияет состояние периферических сосудов. Процессы регулирования могут затрагивать параметры биохимии крови, изменять количество гемоглобина, кислородную емкость крови, количество эритроцитов, могут привести к изменению типа эритроцитов (эритропоэз).

Система терморегуляции показана на рисунке 4. Известно, что в организме человека и многих животных поддерживается постоянная температура тела, не изменяющаяся при довольно резких изменениях внешних условий. Это постоянство температуры обеспечивает необходимую скорость обменных процессов и позволяет животному существовать в неблагоприятных условиях внешней среды. Оно обусловлено функционированием системы терморегуляции, которая представляет собой пример замкнутой биологической системы регулирования. Основным переносчик тепла – кровь. Передача тепла внутри организма осуществляется путем конвекции, обеспечиваемой кровообращением, так как теплопроводность тканей организма весьма мала. Имеется много регулирующих воздействий, оказывающих влияние на температуру тела. Так, теплопродукция определяется процессами окисления в мышцах (М) и внутренних органах (ВО), а на теплоотдачу влияет изменение величины поверхности тела, учащенное дыхание (Д), потоотделение (П), изменение интенсивности кровотока (К). Конвекцией удаляется 15 % тепла путем нагревания молекул воздуха, соприкасающихся с поверхностью организма; 25 % теплоотвода составляет испарение влаги, присутствующей на коже; почти 60 % тепла удаляется в результате излучения: при температуре среды  $T_{\text{внеш}}$  равна 25 °С в среднем излучается 25 ккал/(м<sup>2</sup>·ч). Минимальная теплопродукция организма составляет 1600–1800 ккал/сутки. В результате интенсивной мышечной деятельности она может увеличиваться во много раз (до 14 000 ккал/сутки).

В организме имеется несколько измерительных элементов. Один из них находится в гипоталамусе и омывается кровью из внутренних областей тела. В нем находятся нервные образования – терморецепторы, расположенные по со-

седству с центрами терморегуляции. Нагревание их выше нормы приводит к усилению процессов теплоотдачи, повышению интенсивности кровотока и уменьшению теплопродукции. Сравнивающее и измерительное устройства объединены в одно целое, поэтому центры терморегуляции выдают сигнал тогда, когда температура внутренней среды  $T_{\text{внут}}$  отклонилась от нормы. Норма определяется системой более высокого уровня в иерархической структуре управления организмом в виде целевой функции для системы терморегуляции.

Рисунок 5 – Схема подсистемы терморегуляции (а) и ее аналог общей функциональной системе (б)

Сигналы управления подсистемами, регулирующими теплоотдачу (органы дыхания, потовые железы, сосуды кожи и т. д.) передаются через систему двигательных нервов (СДН) и вегетативную нервную систему (ВНС). Они вызывают расширение или сужение кожных сосудов, регулируют потоотделение и тонус мышц.

Другой тип термочувствительных элементов – терморцепторы (Тр) (холодовые и тепловые), расположенные на наружном кожном покрове и связанные с центром терморегуляции. Они реагируют как на абсолютное значение и знак внешней температуры, так и на скорость ее изменения. Благодаря этому механизмы регуляции приводятся в действие уже через несколько секунд после начала воздействия температурного возмущения, пока оно не достигает «сердцевины» организма. При быстрых температурных возмущениях возможна интенсивная регуляция.

Структуру системы терморегуляции можно отобразить в виде, аналогичном общей структуре функциональной системы (рисунок 9, б). В качестве конечного полезного эффекта выступает температура внутренней среды организма. Из рисунка видно, что эффекторные воздействия осуществляют подсистемы, включенные одновременно в другие функциональные системы организма: систему двигательных нервов (СДН), системы дыхания (СД), кровообращения (СК) и т. д. Следовательно, эффективность функционирования системы терморегуляции зависит от эффективности функционирования других систем. Можно отметить, что при сильных воздействиях на организм, эффект зависимости функционирования системы терморегуляции от других систем может проявляться в виде доминирующих и конкурентных отношений. Например, интенсивная физическая работа и жаркая погода могут вызвать резкое падение артериального давления (коллапс). Известны также явления перенастройки заданной величины температуры тела в течение суток с  $36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в ранние утренние часы до  $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в поздние вечерние, нарушение качества терморегуляции путем прямого воздействия на центральную нервную систему (самогипноз, алкоголь) и т. д. Все эти явления характеризуют сложность и неоднозначность алгоритмов управления в живых системах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ахутин, В.М.** Биотехнические системы: теория и проектирование [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.М. Ахутин [и др.]. - [Б. м.] : [Б. и.], [2000]. – Режим доступа: [www.osu.ru](http://www.osu.ru). – 25.11.05
2. **Зудин, Д.В.** Биотехнология: учеб. пособие для вузов в 8 кн. / Д.В. Зудин; под ред. Н.С. Егорова, В.Д. Самуилова. - М. : Высш. шк., 1987. – 8 кн.
3. **Попечителей, Е.П.** Аналитические исследования в медицине, биологии, и экологии: учеб. пособие для вузов / Е.П. Попечителей, О.Н. Старцева. -М . : Высш. шк., 2003. - 27 с. - ISBN 5-06-004389-4.
4. **Бусурин, В.И.** Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / В.И.Бусурин. -М. : Энергоатомиздат, 1990. - 256с.
5. **Зотов, Д.Д.** Современные методы функциональной диагностики в кардиологии [Текст] : вопросы и ответы / Д.Д. Зотов, А.В. Гротова; под ред. Ю.Р. Ковалева. -СПб. : Фолиант, 2002. - 118с. - ISBN 5-93929-049-3.
6. **Малов, В.В.** Пьезорезонансные датчики /В.В.Малов. - М: ЭНЕРГИЯ, 1978. – 248с.
7. **Ремизов, А.Н.** Медицинская и биологическая физика: учеб. для мед. спец. вузов / А.Н. Ремизов.- 3-е изд.,испр.. -М. : Высш. шк., 1999. - 616с.