

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
*Кафедра радиоэлектроники*

**А.И. СКОРИНКИН**

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**Учебно-методическое пособие**

**Казань – 2015**

УДК 57.024+62-50+57.084  
ББК

*Принято на заседании кафедры радиоэлектроники  
Протокол № 6 от 14 мая 2015 года*

**Рецензент:**

доктор биологических наук,  
проф., **Гайнутдинов Х.Л.**

**Скоринкин А.И.**

**Биотехнические системы / А.И. Скоринкин.**– Казань: Казан. ун-т, 2015.– 85 с.

Биотехнические системы представляют собой попытку использования сильных сторон биологических и технических систем и взаимокompенсации их недостатков. Такого рода системы широко применяются в человеческой практике, однако их исследование и проектирование затруднительно ввиду сложности теоретического описания живых объектов.

© Скоринкин А.И., 2015  
© Казанский университет, 2015

## Содержание

1. Основные представления о системах .....	4
2. О БТС .....	10
3. Классификация БТС .....	16
4. Теория управления и биосистемы .....	18
5. Метод пространства состояний .....	22
6. Оптимальность и адаптация в биосистемах .....	25
7. Сохранительные способности живых систем .....	31
8. Теория функциональной системы .....	35
9. Психология и нейрофизиология – история взаимодействия .....	45
10. Управление движением в биосистемах .....	51
11. Алгоритмическое управление движением .....	58
12. Организация простого движения в биосистемах .....	67
13. Что же такое управление? .....	74
14. О локомоции .....	79
15. Литература .....	84

## 1. Основные представления о системах

Дисциплина, занимающаяся разработкой, построением и анализом биотехнических систем (БТС), не является наукой в строгом философско-методологическом смысле. Каноническое понятие науки когда-то придумал Галилей и «галилеевская» наука есть специальным образом организованная машина по конструированию знаний. Хотя наука всегда работает с неким объектом, она задает определенную точку зрения на этот объект и выстраивает свой предмет (некий «плоский отпечаток» объекта; см. рис. 1), в котором, собственно, и появляются знания. Например, физика строит знаковые модели автономных монопроцессов в неживой природе. Понятно, что по поводу одного объекта разными науками может быть построено множество разных предметов.

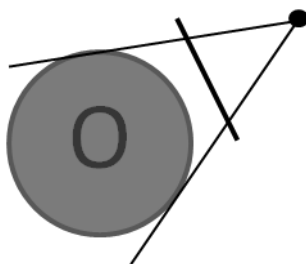


Рисунок 1. Объект и построенный наукой предмет.

В предмете все более-менее ясно, но как работать с объектом? Традиционный научный подход неприменим (один из ходов – упростить объект, «опредметить»). Однако практика чаще всего требует именно работы с объектами. Отсюда, именно как попытка работать с объектами, и возникают науки «негалилеевские», иного типа – синергетика, робототехника, эргономика и т.д. К этому классу наук относится и БТС.

Одним из самых известных средств для работы с объектами путем конфигурирования знаний из разных предметов является системный подход, иногда описываемый также как особая наука («негалилеевская», разумеется) системология. Для тех, кому интересно – история развития системологии и

некоторые ее принципы подробно описаны в великолепной книге Б.С. Флейшмана «Основы системологии».

Ключевым для системного подхода является, естественно, понятие системы. Здесь важно подчеркнуть, что именно понятие, а не определение, ибо понятие есть то, с чем можно работать, а определение, по меткому замечанию Эйлера, есть «гроб для мыслей и идей». Например, есть такое популярное определение системы: *«Совокупность элементов, определённым образом связанных и взаимодействующих между собой для выполнения заданных целевых функций»*. И что можно сделать на основе этого определения?

Широко распространён натуралистический подход к системе: это вот система или нет? Поэтому очень важно подчеркнуть, что система есть понятие чисто функциональное. То есть система есть то, что мы рассматриваем как систему. Или, говоря иначе, система есть не свойство объекта, а способ рассмотрения!

Чтобы построить понятие системы – вернёмся назад, в 19 век, к возникновению первого понятия системы (чуть забегаая вперед, их всего существует два). Впервые понятие системы «выросло» из понятия структуры – из химии. В конце 18 в. под влиянием трудов философа-сенсуалиста Этьена Бодо Кондильяка три французских химика, Лавуазье, Фортруа и Бертоле (создатель, кстати, «бертолетовой соли») разработали учение о составе. Они исходили из того, что язык химии надо строить так, чтобы изменения и преобразования в языке отражали изменения и преобразования в объекте. А что делали тогда химики? Разделяли объект на части и соединяли их, делая как бы элементами. Получается состав. В придуманных Лавуазье, Фортруа и Бертоле формулах ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и т.д.) воспроизводится процедура разделения объекта на части и соединения в целое. И долгое время этот язык исправно работал в химии (собственно, работает и сейчас, но уже не один). Однако

позднее стали возникать ситуации, когда вещества имели одинаковый состав, но разные свойства. Классический случай – бензол (Бутлеров – Кекуле). И тогда возникло понятие о структуре, как объяснение разных свойств при одинаковом составе (рис. 2). «Изомеры – это соединения, обладающие одинаковым элементарным составом, но различным химическим строением.»

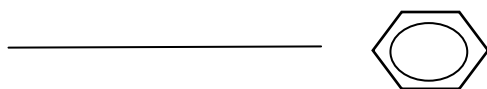


Рисунок 2. Линейная структура и бензольное кольцо.

Вот именно здесь, в химической структуре, и появляются впервые элементы и связи. При фокусировке (логической) на элемент – связи рассматриваются как свойства элемента и называются валентностью. Кстати, тонкий аналитик Д.И. Менделеев был категорически против этой идеи Бутлерова. Он спрашивал: «Что есть эти ваши связи в реальности? Вы можете мне дать для анализа пробирочку связей?» Бутлеров честно признал, что «вещественно» связей в реальности нет, это мы так обозначаем, какие-то неясные нам процессы. Так был зафиксирован принципиальный отход от химии Лавуазье, Фортруа, Бертоле, в которой нет никаких процессов, а есть только процедуры, которые совершают химики.

Попытаемся теперь вскрыть логическую структуру первого понятия системы. Его основой является понятие разделения-соединения (рис. 3). Взяли нечто, выявили свойства, разделили (есть целое – нет частей и наоборот). Выявили свойства частей – далее надо собирать. Вот при сборке и возникают элементы и связи – это понятия функциональные (что соединять, чем соединять). Примеры: стул, батон, зеркало. Элементы – это связанные части, входящие в целое (в отличие от частей). Связи появились в теоретическом мышлении химиков как предполагаемый способ сборки частей в одно целое.

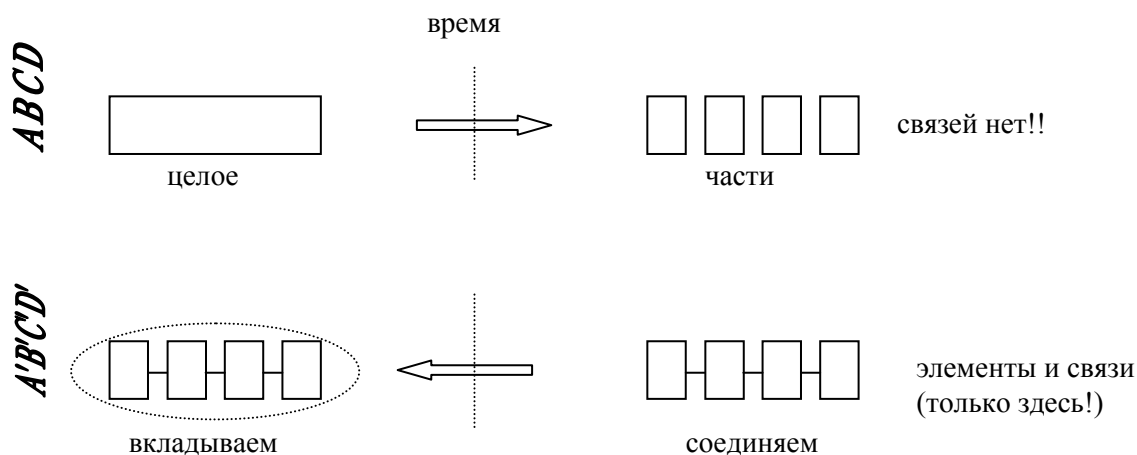


Рисунок 3. Логическая структура первого понятия системы.

И тогда вопрос – а это собранное – такое же, как было? Контур со свойствами целого опускаем вниз, вкладываем – должно быть тождественно. Подчеркнём, что свойства частей и целого очень слабо коррелируют. Свойства целого не определяются свойствами частей (и не только в химии).

Вспомним Лавуазье и К<sup>о</sup>. В созданном ими языке состава воспроизводилась работа химика: разделить-соединить. И в нем нет никаких процессов, происходящих в природе. То есть в философско-методологическом смысле химия не естественная наука, а конструктивно-техническая, поскольку она описывает только процедуры, которые производит химик. Вещественные части присутствуют там вторичным образом, главное – процедуры, которые можно осуществить с веществом. Знание процедур фиксируется как законы, но, обратите внимание, как законы природы, а не человеческой деятельности. Тут хитрый логический выверт Лавуазье и К<sup>о</sup>: химик делает только то, что природа могла сделать, но почему-то не сделала.

Фиксируем важный тезис: представление об объекте задаётся теми

процедурами, которые мы к нему применяем. Видение объекта есть не что иное, как спроецированные на материал объекта наши процедуры. Но если мы только анализируем человеческую деятельность, то при чём тут природа? Ответ такой же, как в химии. Мы будем изучать операции, которые производят химики, но они делают только то, что природа могла бы сделать, но почему-то не сделала. Если химикам удалось что-то сделать, значит природа это и определила. Таким образом мы косвенно изучаем саму природу. (Логический фетишизм Гегеля).

Еще раз кратко сформулируем первое понятие системы. Как писал ещё Бутлеров – элементы материально не существуют, это наша функционализация. Берем целое, разрезаем (обычно мысленно, а не в реальности) – получаем части. Части связываем – они становятся элементами, а между ними связи. Берём конфигурацию связей, стягивая элементы в точку – это структура. Кладем её в контуры целого и начинаем воспринимать элементы как частицы материала – вот и система.

Собранное целое отождествляется с первоначальным за счёт совпадения свойств. Если свойства не совпадают – непорядок, либо в мышлении, либо в природе, кому как приятнее.

Важно подчеркнуть, что от набора частей нельзя вернуться к целому. Гегель: «У человека нет частей, части есть у трупа». Надо собрать – ввести связи, вначале в мысли, затем оестествить. Для отождествления считаем, что мы эти связи разрушили при разделении и теперь восстанавливаем.

Но такой объект не имеет процессов, первое понятие системы и первый системный подход оставляли процессы в объекте вне своего внимания. Единственное, что они фиксировали, это процедуры, осуществляемые над объектом, и предполагали, что эти процедуры и есть осуществление тех процессов, которые есть в объекте. И за процессами (что там в веществе происходит) химики пошли к физикам. Химики – конструктивные техники на материале природы, у них схема объекта есть ничто иное как фиксация



процедур практических и познавательных, которые мы применяем к объекту или применяли. И вторичным образом за счёт этих процедур, если у нас правильные процедуры, изображение структуры самого объекта (связь – то, что можно разрезать, надеясь, что части останутся жить; функциональные элементы – «живые» части).

То есть наши схемы-изображения объектов представляют собой изображение процедур операций, которые мы производим с объектом, свернутые и представленные в виде строения объекта. Примеры: двигатель, завод. Отсюда ясно, что нет объектов-систем, есть объекты, представляемые нами как системы. Чтобы представить объект как систему, надо суметь разложить целое на части, части связать и всё это положить внутрь и рассматривать как целое.

Второе понятие системы. В первом системном подходе многое теряется (в частности, процессы), для полного представления объекта первый системный подход необходимо дополнить еще чем-то. Второй системный подход возник в радиотехнике и представляет собой т.н. «пятыслоюку» – 5 разных интерпретаций одной структурной схемы, 5 языков описания. В рамках этого подхода системное изображение объекта – это описание его схемы в 5 разных языках: процессов, связей, функций, организованности материала (след процессов на материале, направляющие процессов) и собственно материала и «зашнуровка» их так, чтобы процессы соответствовали связям, функциям и обратно, чтобы материал обеспечивал организованность, функции, связи, процессы. Примеры: Телевизор; река. Выбор объекта – также форма мыслимости, зависит от задачи.

То есть представить объект как систему (во 2 системном подходе) означает представить его как структуру процессов, структуру связей, структуру функций, структуру организованностей и материал.

Возможны повторные шаги – каждый раз развёртка из слоя материала.

Спроектировать объект – значит представить его как такую схему + план её реализации. Можно сказать, что техническая организация работ есть способ закрепления в некотором материале процессов, которые нас интересуют.

## 2. О БТС

К сожалению, в существующих описаниях БТС присутствуют логическая невнятица и натурализм. Процессы, функции, управление – все в куче. Это типичный недостаток прикладных исследований, не опирающихся на хорошую абстракцию.

Как понимают системы?

- 1) Как элементы, связи и отношения между ними.
- 2) Как класс математических моделей с определёнными свойствами.
- 3) В рамках теории регулирования (вход, выход, переработка информации, управление).

Иерархия – всякая система (С) состоит из систем и входит в системы. Значит: в рамке 1 системного подхода – можем разделить и связать, функционально. Во 2 системном подходе – нет никаких подсистем. 2 системы соединяем – получаем одну. Это форма видения объекта.

Динамические С – меняют состояние при воздействиях, производные параметров по времени не равны нулю. Статические – не меняют.

Закон поведения. Система:  $y_j = f_j(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r)$ , где  $u_i$  – выходные сигналы,  $x_i$  – входные сигналы,  $u_i$  – параметры. Вообще говоря, ничего не даёт, т.к. параметры – что угодно, по ситуации. Предыстория, обратные связи и т.д.

В системе могут меняться (от рассмотрения, по ситуации) связи и элементный состав, что затрудняет изучение. В С из  $n$  элементов может быть  $n \cdot (n-1)$  связей, число состояний системы (только да-нет)  $2^{n \cdot (n-1)}$ . При  $n = 7$  это  $2^{42} > 4 \cdot 10^{12}!!$  А в мозгу  $\sim 10^{14}$  элементов. Описательный подход

бесперспективен.

«Реальные системы трудно объединить в какие-то естественные группы, т.к. они имеют разную природу и назначение. ... По сложности можно выделить три класса динамических систем: простые, состоящие из небольшого количества элементов и характеризующиеся простым динамическим поведением; сложные, структура которых отличается разветвленностью и разнообразием связей, но поддается точному описанию; очень сложные С, точно и подробно описать которые нельзя.

По характеру поведения различают детерминированные и стохастические системы. Для детерминированных С точно известен закон поведения, для стохастических можно определить вероятность того или иного её 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 ... 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 и информационные системы, имеющие некоторое количество информационных входов и выходов.

Возможна классификация систем по характеристикам элементов, например линейные, нелинейные и гистерезисные С; по типу связей между элементами – замкнутые, разомкнутые, с прямыми и обратными связями и т.п.

Приведённые примеры возможных подходов к классификации не являются строго формализованными и в определённой степени произвольны.» (*Биотехнические системы: Теория и проектирование. Под ред. В.Я. Ахутина.– Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1981.*)

### Способы описания систем.

Функциональное описание. Назначение системы, целевая функция системы. (Описание объекта как функционального элемента. Строго говоря, не описание системы. Объективной целевой функции нет – это по ситуации. О единой целевой функции – попытка учесть все возможные ситуации, малореально.).

Морфологическое описание. Элементы, связи, структура (1 системный подход). Необходимость и функции элементов. Экстирпация (удаление) – некорректный способ. Понять это можно лишь логически, поняв функции и структуру. Гомогенные, гетерогенные элементы. Связи – информационные, вещественные, энергетические (зависит от рассмотрения).

Структуры – многосвязные, иерархические, смешанные (рис. 4).

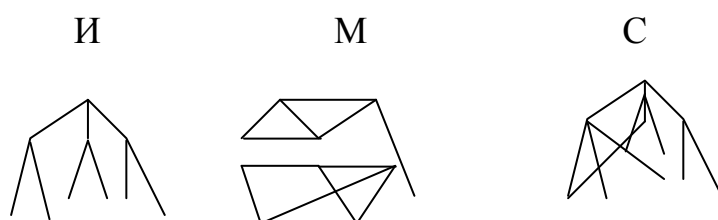
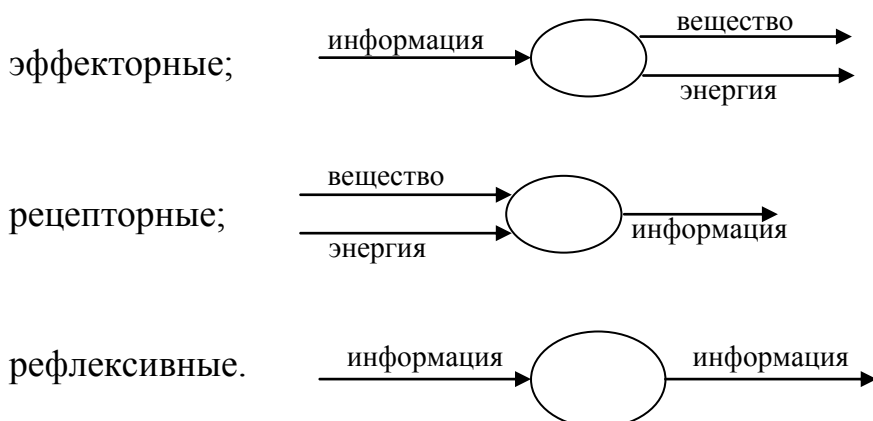


Рисунок 4. Иерархические, многосвязные и смешанные структуры.

Типы элементов:



Информационное описание. Информационные потоки, предсказание поведения. Что такое информация?? Информационный метаболизм – обмен

со средой квантами информации. Информационное описание связано с морфологическим и функциональным – но как? Информация – самостоятельный вопрос.

БТС – совокупность биологических и технических элементов, объединённых в единую функциональную систему целенаправленного поведения. (Т.е. всегда – 2 рассмотрения. Как элемента надсистемы – цель, функция. И потом как системы – 1 подход – с заданным базовым процессом – из цели.)

***Преимущества биологических и технических систем, взаимокompенсация недостатков – вот основная идея.*** Главное положительное свойство – суперадаптивность. Практически пока многие задачи решают только БТС. Примеры – пульт в транспорте, экскаватор, пульт управления в военных системах.

2 контура адаптации – внешний и внутренний. Внешний – к среде, внутренний – к изменениям состояния элементов БТС. Внешняя пластичность – в основном за счет биологических элементов, внутренняя – технические элементы следят за состоянием биологических элементов. Чисто практическая задача – сопряжение технических и биологических элементов.

Сформулировано 2 основных принципа:

1) Принцип адекватности, требующий согласования основных конструктивных параметров и характеристик биологических и технических элементов БТС. (Рука – рычаг. Длина, усилие и т.п.)

2) Принцип единства информационной среды, требующий согласования информационных потоков между биологическими и техническими элементами. (Необходимость и достаточность.)

Т.к. БТС – искусственные (в этом рассмотрении), главное для них – задача синтеза. Например, для наиболее распространённых БТС с человеком-оператором (функция управления) – результаты исследования ЦНС.

Выражается в следующем (принципы построения БТС):

1) При построении структурно-функциональной схемы БТС используется принцип обработки основных потоков информации специализированными периферическими системами. Эти системы минимизируют объём информации и перекодируют её в форму, адекватную для восприятия оператором, т.е. осуществляют процедуру оптимальной фильтрации.

2) Периферические системы могут осязаться, а информация может перераспределяться по различным сенсорным входам только по запросам из управляющего центра системы.

3) Основные элементы системы обмениваются информацией, что позволяет осуществлять процедуры внешней и внутренней адаптации.

4) При синтезе эффекторных подсистем БТС реализуются результаты бионических исследований процессов деятельности человека как управляющего звена, получившие техническое воплощение в адаптивных органах управления.

5) Для установления связи между режимами функционирования воспринимающих систем и состоянием организма оператора, исследуются психофизиологические корреляты, которые используются при выборе режима распределителей и преобразователей информации.

6) Вводится специальный контур регенерации системы (контур нормализации состояния оператора), управляемый системой текущей диагностики состояний психофизиологических характеристик организма оператора.

Внешний и внутренний контуры адаптации – также полезен бионический подход. У живого такие контуры есть. Приспособление к среде обитания, адаптация органов друг к другу (или особей в виде).

Информация биологическим элементам должна поступать достаточная для решения задач и в адекватной форме. Здесь часто выручает большая

адаптивность самих биосистем. Сложнее – адаптация технических элементов, их режимов к состоянию биологических элементов. Требуется непрерывной диагностики состояния биологических элементов.

Системы текущей диагностики. Одно из наиболее развитых направлений сейчас. Самостоятельный контур БТС либо часть контура диагностики и нормализации состояния. Есть в подавляющем числе БТС. Главный предмет биомедэлектроники, медицинского приборостроения, биомедкибернетики.

Особые свойства БТС, определяемые прежде всего наличием биологических элементов и затрудняющие анализ и синтез – недетерминированность, нелинейность, многосвязность.

Метод поэтапного моделирования при создании БТС. Реализует вышеуказанные принципы. Основные этапы:

1. Подготовительный. Целевая функция БТС. (Требуемые процессы).  
Общая структура БТС. Выбор типа биологического элемента, его роль в БТС.  
Математическая модель с функцией биологического элемента (обобщённо, упрощённо и эмпирически).

2. Управленческое согласование характеристик элементов БТС. Набор характеристик-требований к звеньям. Подобрать конкретно биологический элемент, провести необходимые эксперименты для определения режимов (на самом элементе или его аналогах), подогнать параметры технических элементов (конструктивные, силовые и т.д.).

3. Информационное согласование. Минимизация входа на оператора. Методы предварительной обработки информации. Решающие правила программ обработки информации. Требование к техническим устройствам. Экспериментальные проверки.

4. Заключительный. Испытание БТС в полунатурных и натуральных условиях.

### 3. Классификация БТС

По целевой функции. 3 группы.

- Медицинского назначения, БТС-М.
- Эргатического типа (человек-оператор в качестве управляющего звена), БТС-Э.
- Целенаправленного управления поведением целостного организма(мов), БТС-У. (Биотехнология).

Прикладное разбиение. Оно пока и единственно возможное.

Цели БТС-М (рис. 5) – диагностика состояния живого организма, управление состоянием, компенсация функций, исследовательские и целебные процедуры.

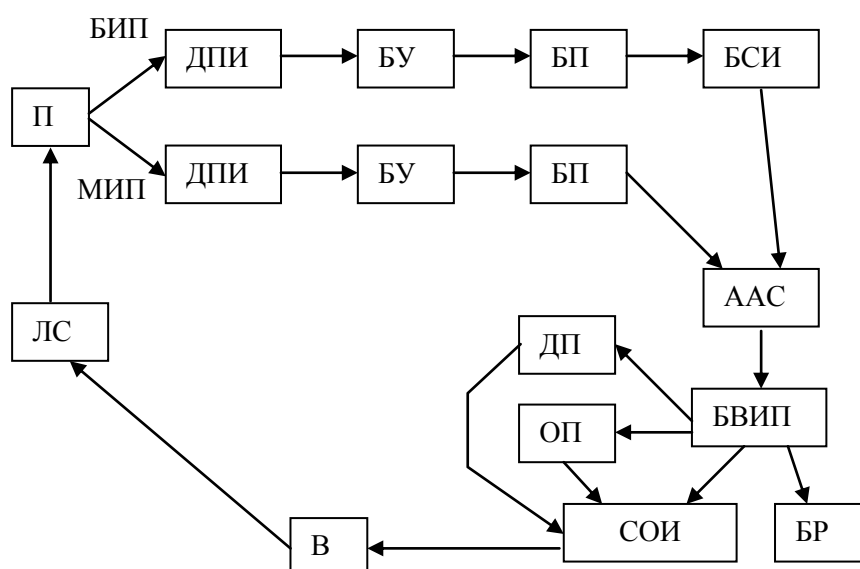


Рисунок 5. БТС-М. ДПИ – датчик-преобразователь информации, МИП – медленно идущие процессы, БИП – быстро идущие процессы. (ЭКГ, ЭМГ, ЭЭГ), БУ – блок усиления, БП – блок преобразования, БСИ – блок сжатия информации, ААС – автоматический анализатор ситуаций, БВИП – блок выделения информативных признаков, ДП – долговременная память, ОП – оперативная память, БР – блок регистрации, СОИ – система отображения информации, В – врач (ЭВМ, управляющий блок – при компенсации функций), ЛС – лекарственные средства, П – пациент.

Цели БТС-Э (рис. 6) – управление техническими системами. Проверка и отбор операторов. Подготовка операторов – обучение и тренировка.



Тренажер – тоже БТС, но реальные объекты заменены моделями и есть обучающий.

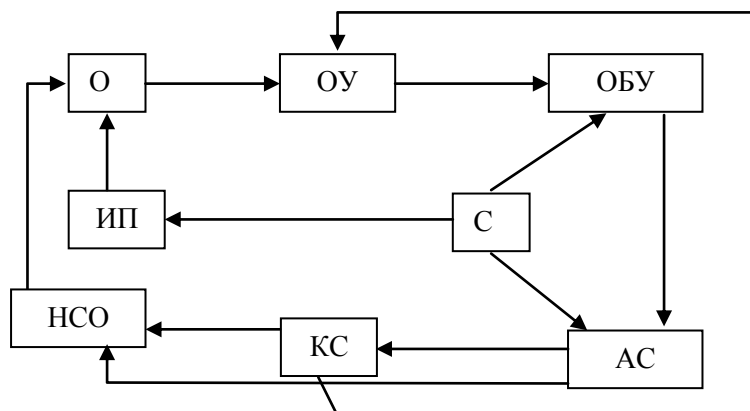


Рисунок 6. БТС-Э. О – оператор, ОУ – органы управления, ОБУ – объект управления, С – среда, ИП – информационное поле, АС – анализатор состояния, КС – классификатор ситуаций, НСО – нормализация состояния оператора.

Цели БТС-У (рис. 7) – управляемый эксперимент, биотехнологические системы. В БТС-У обязательно присутствуют два биологических элемента (в БТС-М может быть один).

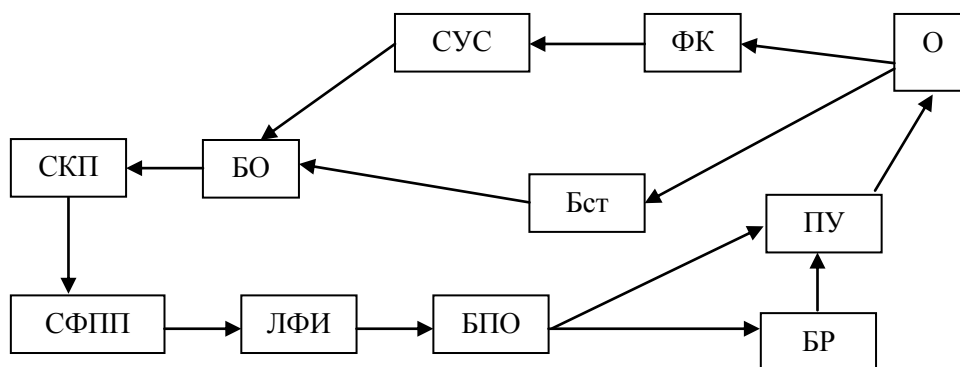


Рисунок 7. БТС-У. БО – биообъект, СКП – система контроля поведения, СФПП – система формализации параметров поведения, ЛФИ – логический фильтр информации, БПО – блок предварительной обработки, БР – блок регистрации, ПУ – пульт управления, О – оператор, ФК – формирователь команд, СУС – система управления состоянием (команды), Бст – биостимуляция.

#### 4. Теория управления и биосистемы

Историю теории управления можно разбить на 2 этапа. 1 этап – до 60-х годов 20 в. – были разработаны понятия обратной связи, передаточной функции, методы преобразования и решения дифференциальных уравнений управляемых систем. В основном исследовались системы с 1 входом и 1 выходом. 2 этап – разработаны матричные способы описания и исследования систем, исследована устойчивость по Ляпунову, разработаны методы вход-выход-состояние.

Теория управления решает 2 типа задач. 1 тип – задачи анализа. Для заданной системы найти её реакцию при заданном входном воздействии. Система задается моделью (из стандартных элементов). Сами модели строятся вне (!) теории управления. Выбор (какие сигналы – куда) определяется ситуацией исследования. Описание – дифференциальные уравнения (особенно хорошо для линейных случаев). Главный метод анализа – решение дифференциальных уравнений. Для этого разработано преобразование Лапласа. Есть методы, позволяющие делать выводы о некоторых свойствах систем не решая дифференциальные уравнения, по их коэффициентам.

2 тип задач – задачи синтеза. Синтез систем с заданными свойствами: модель объекта готовая. Выбрать такое управляющее устройство (регулятор), чтобы объект с регулятором дал систему с нужными характеристиками. Требуется устойчивость, качество переходных процессов.

Синтез системы управления (СУ), обеспечивающей наилучшие возможные характеристики – задача об оптимальном управлении. Требуется много знать о системе и среде, это очень сложно. Отсюда задача – сохранение качеств управления при неожиданных возмущениях – адаптивная СУ. Адаптивность и оптимальность, вообще говоря, не связаны. Адаптивная система может быть не оптимальной и наоборот.

Теория управления занимается в основном задачами синтеза, а

биологию интересует прежде всего анализ (и построение моделей).

Поведение системы во времени описывается изменением некоторых величин. Величины, меняющиеся во времени в процессе функционирования системы, называются её переменными. Их изменение зависит от некоторого числа постоянных (при функционировании) величин – параметров. Различие переменных и параметров – довольно туманное. Параметры – относительно постоянны, меняются только от внешних причин. Но есть и параметрические обратные связи. Традиции и интуиция исследователя.

Моделирование. Требуется математическое описание. Обычно математическая модель процессов представляет собой систему дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d^k x_i}{dz^k} = f_i(x_1, x_1', x_1'', \dots, x_1^{(k-1)}, \dots, x_r, x_r', x_r'', \dots, x_r^{(k-1)}, z), \quad i = 1 \div r.$$

Эта система стандартным методом сводится к нормальной форме Коши:

$$dx_i/dz = f_i(x_1, \dots, x_m, z), \quad m = r \cdot (k - 2).$$

Если  $z = t$ , то это динамическая система, описывающая процессы во времени. Решение определяется начальными условиями.  $x_1 \div x_m$  – фазовые координаты системы. Совокупность фазовых координат определяет состояние системы в текущий момент времени. Блок-схема – качественная, отражает только основные связи некоторых переменных. Схема моделирования – строгое графическое отражение уравнений системы. Элементы схемы моделирования:

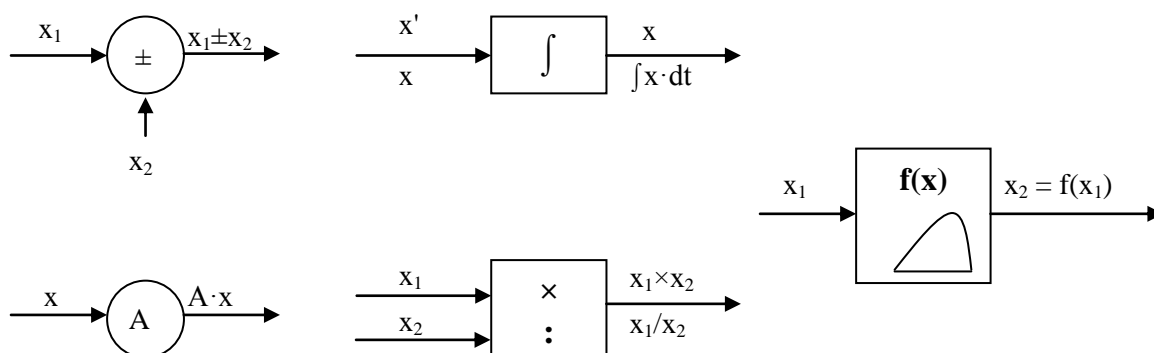


Схема обычно строится с ряда интеграторов. Пример: кровеносный

сосуд как эластичный резервуар.  $x$  – количество крови в сосуде.  $x' = w - y$ ,  $w$  – приток,  $y$  – отток. Пусть  $w = \text{const}$ . Давление  $p = (x - a)/c$ ,  $a$  – ненапряжённый объём.  $y = (p - b)/R$ ,  $b$  – давление в полости слива. Итого  $x' = w - (x - a)/(R \cdot c) + b/R$ .

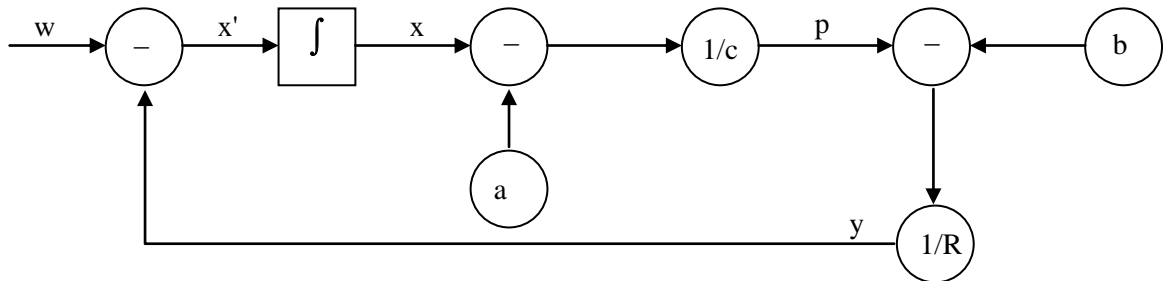


Рисунок 8. Схема моделирования кровеносного сосуда как эластичного резервуара.

$$\text{Решение: } x = a + R \cdot c \cdot \left( w + \frac{b}{R} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{R \cdot c}} \right).$$

Система называется линейной, если справедлив принцип суперпозиции: если  $y(v_k)$  – реакция системы на воздействие  $v_k$ , то:

$$y\left(\sum_{k=1}^n c_k \cdot v_k\right) = \sum_{k=1}^n c_k \cdot y(v_k).$$

Тогда можно записать:

$$\dot{y}_i = \sum_{j=1}^r a_{ij} \cdot y_j + \sum_{v=1}^m b_{iv} \cdot v_v + \sum_{\mu=1}^n c_{i\mu} \cdot w_\mu,$$

где  $y$  – выходы,  $w$  – входы,  $v$  – возмущение, всё это переменные системы.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры системы. Это не общий вид, есть ещё линейные дискретные, с запаздыванием и др. Живое обычно нелинейно (и не только живое). Линеаризация (по приращениям около точки).

Пример. Пусть  $X_3 = k \cdot X_1 \cdot X_2$ . Установившийся режим:  $X_3^0 = k \cdot X_1^0 \cdot X_2^0$ . Подставим  $x_1 = X_1 - X_1^0$ , получим тогда  $X_3^0 + x_3 = k (X_1^0 + x_1) (X_2^0 + x_2) = k \cdot X_1^0 \cdot X_2^0 + k \cdot X_2^0 \cdot x_1 + k \cdot X_1^0 \cdot x_2 + k \cdot x_1 \cdot x_2$ . Отсюда  $x_3 = K_1 \cdot x_1 + K_2 \cdot x_2$ , где  $K_1 = k \cdot X_2^0$ ,  $K_2 = k \cdot X_1^0$ .

Обратная связь. От входа к выходу – прямая, от выхода ко входу – обратная. Зависит от трактовки (для сложных случаев – когда, скажем, много входов и выходов). Работает только в простых (упрощенных) системах. В биологии часто – параметрическая обратная связь (стабилизация; рис. 9). Также часто используется при моделировании биосистем отрицательная обратная связь по отклонению от уставки (рис. 10). На таком уровне и применяется пока.

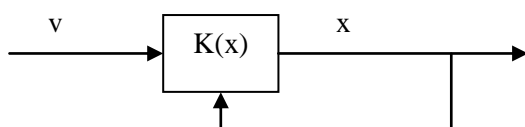


Рисунок 9. Параметрическая обратная связь.

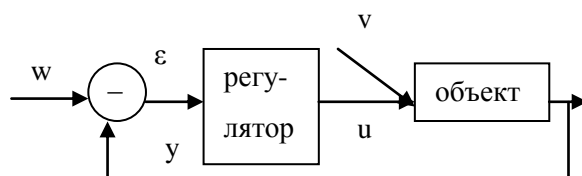


Рисунок 10. Отрицательная обратная связь по отклонению от уставки ( $w$ ).

Устойчивость. Свободное движение после действия возмущения. Если после снятия возмущения состояние системы восстанавливается или не уходит далеко – оно устойчиво. Строгая формулировка. Пусть дана система обыкновенных дифференциальных уравнений  $x'_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$ , где все  $f_i$  таковы, что  $\partial f_i / \partial x_k$  существуют и непрерывны. Пусть  $\varphi_i(t)$  – решение системы, удовлетворяющее при  $t = t_0$  условиям  $\varphi_i(t_0) = \varphi_i^0$ .  $\varphi_i(t)$  – устойчивое по Ляпунову решение, если для любого  $\varepsilon > 0$  можно указать  $\delta(\varepsilon)$  такое, что для всякого решения  $\psi_i(t)$ , начальные условия которого удовлетворяют неравенствам  $|\psi_i^0 - \varphi_i^0| < \delta(\varepsilon)$ , для всех  $t \geq t_0$  справедливо  $|\psi_i(t) - \varphi_i(t)| < \varepsilon$ . Т.е. решения, близкие по начальным значениям, остаются близкими и в дальнейшем. Если же хоть для одного  $\psi_i(t)$  условия не выполняются –

решение  $\varphi_i(t)$  неустойчиво. Если  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\psi_i(t) - \varphi_i(t)| \rightarrow 0$ , то решение  $\varphi_i(t)$  асимптотически устойчиво.

Чувствительность. Свойство менять режим и характеристики при изменении (стабильном) какого-либо параметра. В исследовании устойчивости – действие возмущения снимается и исследуется свободное поведение. В исследовании чувствительности – возмущение постоянно.

Пример – зимняя спячка. Устойчивы физиологические процессы, но чувствительны к изменению температуры среды.

## 5. Метод пространства состояний

В основном применяется для исследования линейных систем (как и большинство методов). Матричный метод, применим при возможности описать систему как  $x'_j = a_{ij} \cdot x_i$ , где  $A = [a_{ij}]$  – матрица, определяющая все взаимосвязи.

Понятие «состояние системы» в биологии включает широкий круг показателей и характеристик, определяющих её функционирование и реакции на различные внешние факторы. В теории управления состояние динамической системы – наименьший набор величин, который надо задать в данный момент  $t_0$ , чтобы предсказать её поведение в любой момент  $t > t_0$ . Вектор состояния (способ задания этого набора) основан на схеме моделирования. Составляется из выходных переменных всех интеграторов, т.е. из фазовых координат. Есть широкий и практически важный класс моделей биосистем, основное внимание в которых обращается на описание процессов запасания и расходования энергии и веществ, их количества или концентрации (компарментальные модели). Выходы интеграторов здесь показывают текущий запас энергии и веществ. Вектор состояний – вектор концентраций веществ в системе.

Метод пространства состояний пришёл на смену классическому «чёрному ящику» (модели вход–выход–передаточная функция). Реакции

выхода могут быть разными на один вход, передаточная функция не учитывает влияния внутренних переменных.

Достаточным описанием системы считается задание в каждый момент времени её вектора состояния и вектора входов. Динамические свойства системы в современной теории управления описываются с помощью уравнений, связывающих состояния и входы в различные моменты времени. Выходные сигналы выражаются с помощью отдельного уравнения. Система описывается таким образом парой векторных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \Phi[X(t), V(t)], \\ Y(t) = \Psi[X(t), V(t)], \end{cases}$$

где  $V$  – вход,  $X$  – состояние. 1-е уравнение – уравнение состояния, обычно дифференциальное, определяет состояние системы и тем самым задает её динамические свойства. Второе – уравнение входа – алгебраическое, определяет выход через вход и текущее состояние. Для линейных систем:

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot V, \\ Y = C \cdot X + D \cdot V, \end{cases}$$

$A, B, C, D$  – матрицы. Уравнение «вход-выход-состояние». Система описана в терминах вход-выход-состояние.

Практически все биосистемы нелинейны, линеаризация.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \Phi[X(t), V(t)], \\ Y(t) = \Psi[X(t), V(t)]. \end{cases}$$

Исследуем малые отклонения условий функционирования от заданных значений. Если при  $V = V^*$  осуществляется движение  $X^*, Y^*$ , то обозначим:

$$\begin{aligned} v(t) &= V(t) - V^*(t), \\ x(t) &= X(t) - X^*(t), \\ y(t) &= Y(t) - Y^*(t). \end{aligned}$$

Разложим  $\Phi$  и  $\Psi$  в ряд Тейлора и ограничимся линейными членами.

$$\begin{aligned} x'(t) &= A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot v(t), \\ y(t) &= C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot v(t), \end{aligned}$$

где  $A = \partial\Phi/\partial X|_{X^*,V^*}$ ,  $B = \partial\Phi/\partial V|_{X^*,V^*}$ ,  $C = \partial\Psi/\partial X|_{X^*,V^*}$ ,  $D = \partial\Psi/\partial V|_{X^*,V^*}$ .

При  $v = \text{const}$  с течением времени  $X^*$  сходится обычно к стационарному значению и матрицы  $A, B, C, D$  становятся константными. В стационарном режиме при  $v = \text{const}$ ,  $x' = 0$ .  $A x + B v = 0$ . Значит  $x = -A^{-1} B v$ . Переходный процесс возникает в системе либо при изменении входных сигналов, либо при постоянстве их, но когда начальные условия по  $x$  отличаются от равновесных. Устойчивость изучается при  $v = \text{const}$ . Асимптотически устойчивая система – возвращается в равновесное состояние при отклонении  $x$ . Устойчивость системы зависит исключительно от вида матрицы  $A$ .

В стационарном состоянии

$$x = -A^{-1} B v,$$

$$y = D v - C A^{-1} B v,$$

$A$  – основная матрица системы (устойчивость),  $B$  – матрица связи или матрица управления (влияние входов на состояние),  $C$  – матрица наблюдения.

Чувствительность вектора стационарных значений переменных состояния к вектору стационарных значений входов  $dx/dv = -A^{-1} B$ .

Чувствительность выходного вектора  $dy/dv = D - C A^{-1} B$ .

Различия классического подхода «вход-выход» и «вход-выход-состояние». Только цепь вход-выход, остальное – вне рассмотрения. В методе пространства состояний – цельная картина объекта, все связи. Связь объекта с внешним миром – через входы (в т.ч. управление) и выходы (только они доступны наблюдению).

Если структура системы такова, что по заданному выходному сигналу  $y(t)$  можно однозначно восстановить  $x(t)$ , то говорят о наблюдаемости системы. Точнее, состояние  $x(t_0)$  наблюдаемо в момент  $t_0$ , если можно указать интервал  $t \leq t_0 \leq T$  такой, что по известным  $v(t)$ ,  $y(t)$  можно найти  $x(t_0)$ . Если все состояния наблюдаемы в любой момент – система полностью наблюдаема.



Управляемость системы означает, что при заданном виде матриц  $A$  и  $B$  существует такое управление, которое за конечное время переводит систему из любого начального состояния в некоторое заданное конечное. Точнее, если заданное конечное  $x(T)$  может быть достигнуто из начального  $x(t_0)$ , то состояние  $x(t_0)$  – управляемое в момент  $t_0$ . Если все состояния системы управляемы в любой момент времени, то система полностью управляема. Любую систему можно представить (рис. 11) в виде четырех подсистем:

- управляема и наблюдаема.
- управляема, ненаблюдаема.
- неуправляема, наблюдаема.
- неуправляема, ненаблюдаема.

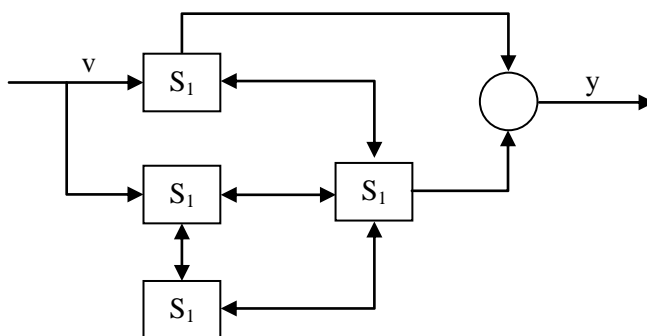


Рисунок 11. Четыре подсистемы, различающиеся по управляемости и наблюдаемости.

## 6. Оптимальность и адаптация в биосистемах

Чтобы поставить и решить задачу об оптимальном управлении, необходимо иметь информацию:

1. Исчерпывающие сведения об управляемом объекте.
2. О среде функционирования.
3. О цели управления.
4. О требуемом качестве процесса управления (количественный показатель – макс., мин.).
5. Данные об ограничениях.

Любая задача оптимизации сводится к выбору лучшего в некотором смысле варианта из большого числа возможных. Каждый вариант  $\rightarrow$  число, определяющее близость к цели. Цель управления – достижение экстремума некоторого функционала  $Q(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{u}, t)$ ,  $\mathbf{x}$  – состояния,  $\mathbf{w}$  – входы,  $\mathbf{u}$  – управляющие сигналы в системе. Оптимальные системы содержат сложные решающие вычислительные устройства, реализующие оптимальный закон управления  $\mathbf{u}_{\text{опт}}(t) = \Phi[\mathbf{x}(0,t), \mathbf{w}(0,t)]$ ;  $\mathbf{x}(0,t)$ ,  $\mathbf{w}(0,t)$  – переменные и входы в текущий момент и их предыстория от начала управления до текущего момента.

Теперь об адаптации. Термин из биологии, исходно так называлось любое приспособление организма к условиям существования. В теории управления к адаптивным относят системы, которые автоматически приспосабливаются к непредвиденным изменениям параметров объекта и внешней среды. В простейшем случае адаптация – в ответ на изменения в среде – изменение параметров регулятора, направленное на сохранение работоспособности и качества системы. Совокупность изменяемой части основного контура и цепи адаптации – адаптивный регулятор (рис. 12).

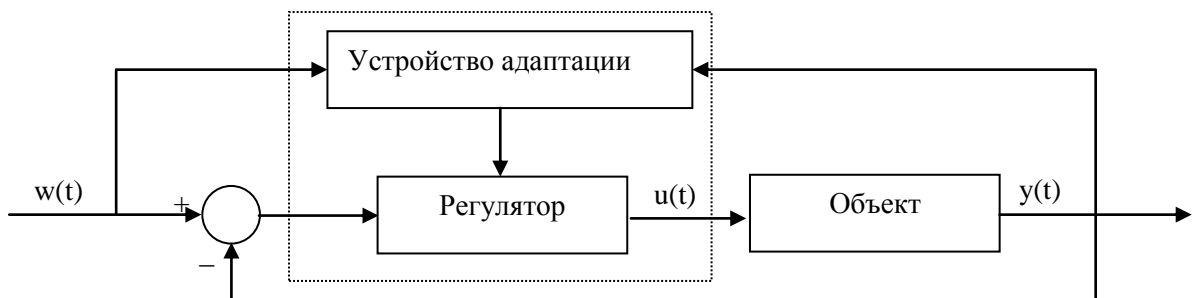


Рисунок 12. Адаптивный регулятор.

Адаптивность, вообще говоря, не связана с оптимальностью. Но адаптация часто используется как средство достижения оптимальности в заранее неизвестных условиях. Простейший механизм адаптации – параметрическая обратная связь. Адаптивное поведение хорошо описано в

классической книге Р. Розена «Принципы оптимальности в биологии» (М.: Мир, 1969). Вместо того, чтобы создавать сложные оптимальные конструкции и алгоритмы, биосистемам достаточно иметь простые адаптивные алгоритмы и за их счёт достигать тех же внешних характеристик – проще и надежнее, хотя и более энергоёмко. Оптимальность и адаптация при этом различные (и даже конкурирующие) варианты достижения одной цели – получения необходимого поведения биосистемы.

Оптимум, оптимальность – применялись в биологии для обозначения наиболее благоприятных условий обитания. Противоположное понятие называлось пессимум. Теперь оптимальность понимается скорее как высокое качество биосистемы, ее наилучшая приспособленность. Корни представлений об экстремальном характере процессов и явлений в живых системах – прежде всего в экстремальных принципах неживой природы. Леонард Эйлер: «Так как здание всего мира совершенно и возведено премудрым творцом, то в мире не происходит ничего, в чем не был бы виден смысл какого-либо максимума или минимума». Это лежит в основе многих фундаментальных законов естествознания. Другой источник представлений об оптимальности живых систем – эволюционный процесс. Движение к некоторому экстремуму. Живые организмы, достаточно долго находящиеся в определенных условиях, приобретают признаки, оптимальные для этих условий. Это происходит при соблюдении двух требований: 1) преимущества передаются потомству, 2) условия остаются неизменными. Биологические системы управления по Розену также подвергаются действию естественного отбора, поэтому оптимизируются и механизмы регулирования их функций.

В целом концепция оптимальности вызывает ряд возражений. 3 группы.

1. Эволюция не приводит к созданию оптимальных биосистем.  
– Экстремальные принципы живого и неживого – разные. В неживом действуют стационарные законы (по крайней мере сейчас). Пусть

биосистемы стремятся к оптимальности структуры и функционирования, но на каком они этапе??

– Стационарный режим достижим в неизменных условиях, но среда, в которой эволюционирует биосистема, меняется во времени с той же скоростью, что и биосистема. Например, человек как биологический вид явно не успевает эволюционировать за изменяемой им средой (или искусственно тормозит эволюцию, стабилизируя среду). Звено «человек-оператор» – самое узкое место в системе «человек-машина».

– Эволюция отдает предпочтение тем видам, которые получают преимущество немедленно. Так достижим лишь ближайший локальный экстремум за счёт мелких конструктивных изменений. С. Лем: «Эволюция оставляет своим творениям самые примитивные органы в биохимическое оснащение, лишь бы с их помощью они управлялись с сохранением вида.»

## 2. Биосистемам не нужна оптимальность.

Для достижения оптимальности необходимо получать и перерабатывать много информации (см. в начале лекции). Даже на организменном уровне это вряд ли целесообразно. При учете всех факторов оптимальность в технических системах дает выигрыш обычно 10-15% по сравнению с грамотным, но не оптимальным решением. Чем ближе система к оптимальности, чем она сложнее, тем более дорогой ценой дается дальнейшее улучшение. Тем более, что любая неопределенность ухудшает качество процессов в системе. Возникает вопрос о компромиссе между улучшением качества функционирования и энергозатратами.

## 3. Концепция оптимального управления неприменима к биосистемам по формальным причинам.

А.А. Ляпунов: «Понятие оптимальности к живой природе во многих случаях просто неприменимо. Дело в том, что об оптимальности можно говорить в условиях, когда высказаны жесткие ограничения на то, что может меняться, когда ясно, что должно оставаться неизменным, и когда имеется

точно очерченная целевая функция. В живой природе в общем случае, эти обстоятельства не имеют места.» И вопрос субоптимальности – один из парадоксов кибернетики. Любой биообъект не изолирован, а включен во что-то. Популяция из более приспособленных особей может оказаться менее приспособленной (динозавры). Нецелесообразные на организменном уровне особенности вида (высокий процент генетических уродств) могут быть необходимы для эволюции. «Материал для эволюции поставляют не победители в борьбе за существование, а побеждённые» – С.Э. Бауэр (Теоретическая биология, 1935). Биологические объект представляют собой многоцелевые системы, выполняющие одновременно несколько разных функций. Нельзя одновременно обеспечить оптимальность во всех случаях, если цели в каждой ситуации разные. В живом также нет жестких ограничений, структура биосистемы формируется в процессе функционирования самой выполняемой функцией. Вместо того, чтобы усложнять алгоритмы управления, добиваясь оптимальности при данных ограничениях, биосистема может, адаптируясь, просто ослабить ограничения – проще и надежнее. Такого теория управления не рассматривает.

Что же взамен? Принцип удовлетворения. По словам У.Р. Эшби «требование найти оптимум может быть излишним; в биологических системах достаточно того, чтобы организм находил состояния или величины, лежащие в заданных пределах.» Нет наилучшего состояния, уравнивание со средой осуществляется не в одной точке, а в некоторой области состояний системы – эти идеи лежат в основе понятий «пределы терпимости» (У. Кэннон, 30-е) и «пределы безопасности» (У.Р. Эшби, 50-е). Здесь происходит разрыв с представлениями о единственном наилучшем из всех варианте достижения цели. Даже понятие нормы – наиболее часто встречающихся значений некоторых величин – меняется со временем. Характеристики организма меняются в ходе адаптации, тренировки. Где здесь оптимальность?

Интересно проследить эволюцию взглядов Н. Рашевского. Выдвинул мысль об оптимальности организмов и отказался от нее (40-е – 60-е годы). В 1943 г. сформулировал принцип оптимальной простоты: из всех конструкций, способных выполнить данную функцию, выбирается простейшая. Но простота – понятие неопределённое, не формализуется. Тогда минимум затрачиваемого материала и энергии (для реализации функции) – принцип оптимальной конструкции. Но требования к оптимальной конструкции зависят от режимов функционирования. Отсюда принцип адекватной конструкции: «Конструкция должна быть адекватна заданной функции при заданных изменяющихся условиях среды.»

Подытожил М. Месарович (1973 г.) для организменного уровня. Принцип удовлетворения – отсутствие жёсткой определённости цели. Цель – достижение множества одинаково желаемых состояний. Принцип удовлетворения формулируется так: Организм характеризуется переменными, определяющими его функционирование  $y_i$ , и теми пределами, в которых возможно их изменение без существенного ухудшения процессов в организме  $\Omega_{y_i}$ . Эти пределы задают диапазон удовлетворения. На организм действуют внешние сигналы  $w_i$ , для которых задаются пределы неопределённости  $\Omega_{w_i}$ . Организм выбирает управление так, что переменные функционирования остаются в диапазоне удовлетворения, пока и поскольку воздействия остаются в пределах неопределённости. Любое такое управление одинаково приемлемо.

Диапазон удовлетворения прямо зависит от пределов неопределённости: когда неопределенность возрастает, система делается более «терпимой» и диапазон удовлетворения расширяется. Когда неопределённость уменьшается, система становится более «честолюбивой», а диапазон удовлетворения сужается.

Вместо сложных алгоритмов достижения оптимума – простые эвристические алгоритмы без памяти, «если-то». Но понятия

удовлетворительности характеристик, достаточности и т.д. – скорее интуитивные, чем формально обоснованные. В ряде случаев – система достигает нужного уровня приспособленности не за счет сложных оптимальных алгоритмов, а за счёт целесообразного изменения параметров в простейших алгоритмах, что позволяет ей существовать в таких условиях, для которых инженер не только не может найти оптимальное решение, но и поставить задачу. Требование хорошего функционирования – не только и не столько оптимальность в строго оговорённых условиях. Реальная система должна при вариациях условий сохранять работоспособность и качество. Робастные системы управления (robust – крепкий, здоровый /англ/). Надо конструировать не оптимальные системы, а те, на которые меньше влияют небольшие отклонения от идеальности. Дж. Тьюки (амер., прикл. статистика): «Многие ли... ясно понимают, в чем единственное хорошее качество оптимума в реальном мире? В чем ценность доказательства того, что меньше всего стекла уходит на сферическую бутылку для молока? ... Единственное хорошее качество его в том, что формальный оптимум будет единственным, и о нём относительно легко писать доклады и его сравнительно легко изучать.» Точная оптимизация не нужна для практических целей ни в одной области. Везде требуется либо получить просто достаточно хорошее решение, или решение, которое лучше существующих.

Живые системы – безусловно «хорошие» системы. Технические устройства ещё долго не достигнут совершенства в функционировании и работоспособности, свойственного живым системам. Но поиски строгой оптимальности были полезными и необходимыми вехами исследования и конструирования.

## **7. Сохранительные способности живых систем**

Одно из важнейших свойств живого. Необходимо учитывать при

построении БТС.

Аристотель (естественное место), Ньютон (инерция), Спиноза: концепция самосохранения: «...никакая вещь не имеет в себе ничего, через что она могла бы уничтожиться..., наоборот, она ... противодействует всему тому, что может уничтожить её существование. Следовательно, насколько возможно и насколько от неё зависит, она стремится пребывать в своём существовании.» Ле-Шателье и Браун формулировали общий принцип самоохранения для термодинамических систем. Принцип Ле-Шателье. Если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, подействовать извне, то равновесие смещается так, что эффект произведённого воздействия уменьшается. (1887). К. Браун – это есть следствие 2 начала термодинамики.

Уолтер Кэннон сформулировал принцип самосохранения для биологических объектов: «В открытой системе, такой, как наши организмы, состоящие из нестабильного материала и подверженные непрерывному воздействию возмущений, само постоянство служит доказательством существования агентов, действующих или готовых к действию, чтобы поддержать это постоянство. Если состояние остаётся устойчивым, то это происходит потому, что любая тенденция к его изменению автоматически вызывает увеличение эффективности фактора или факторов, противодействующих этому изменению.» Одним из важных компонентов этого принципа является понятие гомеостаз (гомеостазис). Равновесие – точное значение, простые физ.-хим. системы, уравнивание сил. Гомеостазис – не есть нечто неподвижное, но относительно постоянно. Сейчас гомеостазом называют сохранение постоянства внутренней среды организма при наличии возмущений во внешней среде. Обеспечивается системой регулирующих механизмов = единый регулятор, обеспечивающий сохранение целостной системы. Гомеостаз отдельной переменной возможен лишь в рамках общего гомеостаза.

Могут ли существовать негомеостатические системы? Видимо, да.



Гомеостатические свойства слабо влияют на численность видов и ареал (кроме освоения новых территорий и очень суровых условий). Наиболее важная и обязательная цель – адекватное снабжение веществами и энергией. Гомеостаз – эволюционно приобретенное для этого свойство, но в принципе постоянство внутренней среды не есть необходимое условие существования системы. Иногда отсутствие или временное отключение гомеостаза выгодно. (Землеройка и колибри, торпидное состояние). Понятие «сохранительные способности биосистемы» есть соединение двух понятий – способности обеспечивать гомеостаз и способности поддерживать стационарное неравновесное состояние (темпы поступления вещества и энергии) при изменяющихся условиях внешней среды.

Концепция гомеостаза включает в себя ряд направлений. Традиционно рассматривается только на организменном уровне – как вегетативная регуляция физиологических систем.

Клеточный уровень. Цитогенетический гомеостаз (ауторегуляция). Основа, базовый уровень. Биохимическая регуляция. Основные виды: угнетение активности ферментов продуктами, репрессия синтеза ферментов продуктами, активация ферментов субстратами, индукция синтеза ферментов субстратами. Клеточная активность хорошо координирована на ферментном уровне. Термин гомеостаз применяется редко; говорят об устойчивости или эластичности.

Многоклеточный уровень – клеточный рост и деление – гомеостаз структуры органов и тканей. Пример: регуляция темпа образования новых клеток.

Уровень организма и его систем. Одновременное действие многочисленных и сложных регуляторов. Уровни: – неспецифический химический регулятор (в клетках); – эндокринная регуляция (спец. железы, глобально на биохимию); – гуморальная регуляция (вещества не в спец. железах, а в самих рабочих органах, но действуют глобально); –

регуляторные механизмы нервной системы.

Биогенетический гомеостаз. Цель регуляции в экосистемах – принцип Лотка: увеличение суммарного потока энергии через систему (увеличение темпов производства органического вещества). Вначале включаются гомеостатические механизмы особей, если не спасает – специфические экологические регуляторы: перестройка видового состава чтобы не допустить уменьшения темпов энергопотребления и продукции. (Заболачивание луга).

Основные свойства гомеостаза.

1. Гомеостатические качества – одно из главных звеньев в системе сохранительных свойств биообъектов. Однако при существенных изменениях условий среды гомеостатические свойства могут нарушаться ради высшей цели – сохранения жизнедеятельности системы.

2. Гомеостатические свойства биосистем проявляются как слабая зависимость некоторых существенных переменных от условий.

3. При существенных сдвигах условий переменные становятся чувствительны к изменениям.

4. Чем сложнее биосистема, тем лучше могут быть её гомеостатические свойства.

5. При переходе к более высокому уровню гомеостатические механизмы данного уровня сохраняются как неспецифический «нижний этаж».

6. Возможности каждого уровня ограничены. При действии стрессорных факторов происходит поочерёдное включение регуляторных механизмов разных уровней. Исчерпание ресурсов гомеостатических механизмов системы не обязательно ведёт к её гибели, могут включаться надсистемные механизмы.

7. Самый нижний слой сохранительных механизмов в биосистемах – простейшие механизмы пассивной регуляции – общий для живых и неживых

(темпы диффузии, положение механическое в пространстве и т.д.).

## **8. Теория функциональной системы**

### Общие предпосылки.

Идея о целостности, о единстве мира. Непосредственное, частное имело прямое практическое значение для усовершенствования приспособительной деятельности человека, и потому абстрактное «целое» пришло в его познавательную деятельность значительно позднее. Целое постепенно приобретало значение чего-то организованного, со своими свойствами, отличающимися от свойств частей. Так подготавливалось научное движение, называемое «системный подход». Половодье аналитических фактов. Оппенгеймер: «...исследователь ощущает своё невежество тем больше, чем больше он знает...». Только какой-то более высокий принцип поможет разобраться в логических связях между отдельными фактами. Система является тем изоморфным принципом, который проникает через все границы, сложившиеся между науками. Поиски «системы» как общего для многих явлений принципа функционирования могут дать значительно больше, чем аналитическое изучение частных процессов. Различные подходы к необходимости введения целостности при объяснении функций организма. Механицизм – полностью отрицал специфику целостной организации, сводил к свойствам элементов. Виталисты всех направлений – связь элементов в целое с помощью некой неорганической силы. Физиология 19-20 вв. – сосуществование противоречивых тенденций. Исследование тонких механизмов. Разочарование в продуктивности одного аналитического подхода. Необходимость «концептуального моста» между явлениями у целостного животного и фактами аналитического эксперимента. Как обеспечить уровень специфически целого и не потерять огромных преимуществ уровня тончайшего анализа? Системный подход (СП) – надежда, что «целое» из

диффузной и неконструктивной формы примет очертания четкого исследовательского принципа. СП – прежде всего изменение формы мышления экспериментатора. Наиболее характерная черта СП – в исследовательской работе не может быть аналитического изучения какого-то частного объекта без точной идентификации этого частного в большой системе. СП – в значительной степени реакция на бурный рост аналитических подходов в науке. Целое, система при своем становлении приобретает собственные специфические принципы организации, не переводимые на принципы и свойства тех компонентов и процессов, из которых формируются целостные системы.

Одной из главных целей поисков системы является именно её способность объяснить и поставить на определённое место даже тот материал, который был задуман и получен исследователем без всякого системного подхода.

Причины неудач и трудностей. Не было поддержки конкретных наук в виде открытия конкретных специфически системных механизмов, а теоретические поиски и определения непомерно разрослись. Понятие системы не стало инструментом, облегчающим конкретную исследовательскую работу. Конкретные исследователи не склонны к общеподобным и методологическим обсуждениям теории систем.

#### Решающая роль системообразующего фактора.

Поиск и формулировка системообразующего фактора – решающее значение для формирования системы. Сторонники общей теории систем как центральное свойство системы – взаимодействие множества компонентов. Иногда «упорядоченное» или «организованное». Вопрос о системообразующем факторе не ставился в отчетливой форме системологами. Поэтому имеющиеся определения системы не отражают ее истинных свойств и не конструктивны. Общая теория систем не вскрыла фактора, который из множества компонентов с беспорядочным

взаимодействием организует упорядоченное множество – систему.

#### Математическая теория систем.

Сначала на чисто теоретическом основании формулируется математическая теория систем и после этого ее «задания» применяются к объяснению биологических явлений. Для биолога и физиолога это нонсенс. Как можно чисто математическую модель, разработанную заранее в обход знаний об особенностях конкретно биологической организации, применить к объяснению биологических закономерностей? Взаимодействие должно быть организовано в обратном порядке. Реальные «системные закономерности» могут быть разработаны только на базе конкретного материала биологии. Можно ли математически определить биологическую систему, если мы не можем наделить ее важнейшим свойством живой системы: формированием потребности получить определенный результат, который фиксируется обычно уже в начале формирования поведенческого акта. Цель всегда опережает реализацию ее организмом, т.е. получение полезного результата. Потребность в каком-либо результате (цель его получения) зреет внутри системы, в глубине ее метаболических и гормональных процессов, и только потом по нервным «приводным ремням» эта потребность реализуется в поведенческих актах, допускающих в какой-то степени математическую формализацию.

#### Понятие системы.

Взаимодействие как таковое не может сформировать систему. Что может извлечь физиолог из: «система – комплекс взаимодействующих элементов», если взаимодействие частей организма для него аксиома? Эшби приводит пример с табло, состоящим из 400 ламп, 20 на 20. Возможное количество комбинаций при 2 возможных состояниях ламп  $10^{10120}$ !!! Это больше числа атомов в видимой части вселенной ( $10^{73}$ ). Нервных клеток около 14 миллиардов. 5000 возможных состояний, по самым скромным подсчётам – 5. Фантастическая цифра. Единица с нулями – на ленте длиной в

9 500 000 километров. Взаимодействие вообще – хаос! Каждый нейрон потенциально имеет огромное число степеней свободы при взаимодействии с другими нейронами. Взаимодействие вообще не может сформировать систему из «множества компонентов». Надо вскрыть те детерминирующие факторы, которые освобождают компоненты системы от избыточных степеней свободы. Далее – попытка выделить системообразующий фактор из свойств живого организма и обсудить изоморфность этого фактора для разных классов явлений.

#### Конкретный результат деятельности как системообразующий фактор.

Именно достаточность или недостаточность результата определяет поведение системы. Можно деятельность системы и ее возможные изменения представить в терминах результата. В вопросах: 1) Какой результат должен быть получен? 2) Когда должен быть получен результат? 3) Какими механизмами? 4) Как система убеждается в достаточности результата? Здесь выражено всё то, ради чего формируется система. Формирование системы подчинено получению определенного полезного результата, а недостаточный результат может целиком реорганизовать систему. Упорядоченность во взаимодействии множества компонентов устанавливается на основе степени их содействия в получении системой строго определённого полезного результата. Более пригоден термин «взаимоСОдействие». Компонент при вхождении в систему должен немедленно исключить все те степени свободы, которые мешают или не помогают получению результата данной системы. И максимально использовать те степени, которые содействуют. Главное качество биологической системы – что она непрерывно и активно производит перебор степеней свободы множества компонентов, чтобы включить те, которые приближают к получению результата. Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлечённых компонентов, у которых взаимодействие приобретает характер взаимосодействия на получение фиксированного полезного результата. Результат благодаря обратной

афферентации имеет возможность реорганизовать систему. Результат является неотъемлемым и решающим компонентом системы, инструментом, создающим упорядоченное взаимодействие между компонентами. Полезный результат является функциональным феноменом и вся архитектура названа функциональной системой.

Одно принципиальное следствие для общепринятой кибернетической терминологии. Выражение «управляющая система» ни семантически, ни логически не может быть принято теорией функциональной системы. Ведь тогда управляемый объект не является уже компонентом «управляющей системы», находится за ее пределами.

«Состояние системы» – непрогрессивное понятие. Система стремится получить запрограммированный результат и ради этого может пойти на самые большие возмущения в состоянии.

Содержание результата формируются системой в виде определённой модели раньше, чем появится сам результат! Т.е. имеет характер предсказания. Сам факт возникновения цели для получения результата – принципиальное противоречие с рефлекторной теорией. Представление о рефлекторном процессе – нерушимый принцип поступательного хода по дуге. При формировании цели уже на начальных этапах распространения возбуждения создается модель конечного результата данного акта, т.е. раньше, чем закончится процесс формирования поведенческого акта и до того, как будет получен результат.

Смысловое подчеркивание оснований ТФС:

1) В функциональной системе результат представляет собой ее органическую часть, оказывающую решающее влияние как на ход ее формирования, так и на все последующие реорганизации.

2) Именно результат отбирает все адекватные для данного момента степени свободы компонентов системы и фокусирует их усилия на себе.

3) Взаимосодействие компонентов системы достигается тем, что

каждый из них под влиянием афферентного синтеза или обратной афферентации освобождается от избыточных степеней свободы и объединяется с другими компонентами только на основе тех степеней свободы, которые вместе содействуют получению полезного результата.

4) Включение результата в функциональную систему исключает необходимость применять термины «управляемая система», «управляющая система».

#### Состав функциональной системы и иерархия систем.

Критериями для употребления термина «система» являлось все, что представляло собой нечто упорядоченное по сравнению с другими явлениями, относящимся к другим классам (система кровообращ., система пищеварения и т.д.). Система – в смысле принадлежности данного феномена к определенному анатомическому типу – это исключает возможность понимания в истинно системном плане. Не акцент на каком-то анатомическом признаке участвующего компонента, а на принципах организации многих компонентов, из многих анатомических структур, с неизменным получением результата деятельности. Функциональные системы организма складываются из динамически мобилизуемых структур в масштабе целого организма и на их деятельности и окончательном результате не отражается исключительное влияние какого-нибудь анатомического типа участвующей структуры. Компоненты той или иной анатомической принадлежности мобилизуются и вовлекаются в функциональную систему только в меру их содействия получению запрограммированного результата. Одним из самых характерных свойств функциональной системы является именно динамическая изменчивость входящих в нее структурных компонентов, продолжающаяся до тех пор, пока не будет получен полезный результат. Каждая функциональная система находится где-то между тончайшими молекулярными системами и наиболее высоким уровнем системной организации в виде, например, целого



поведенческого акта.

Два кардинальных вопроса для понимания тонких механизмов сложных функциональных систем организма:

1) Функционируют ли системы всех уровней по одной архитектуре, характерной для функциональных систем вообще, или эти архитектуры различаются?

2) Какими конкретными механизмами соединяются между собой подсистемы при образовании суперсистемы?

Поскольку центральный момент для любой системы – результат, все функциональные системы независимо от уровня своей организации и от количества составляющих их компонентов имеют принципиально одну и ту же функциональную архитектуру, в которой результат является доминирующим фактором, стабилизирующим организацию систем. Именно полезный результат системы представляет тот реальный вклад, который она может сделать при образовании суперсистемы. Иерархия систем превращается в иерархию результатов подсистем предыдущего уровня.

Другой важный вопрос – как действует эта субординированная иерархия, когда ей надо выступать как целое? Пример – кровяное давление – эмоциональное состояние. Функциональная система поддержания уровня давления. При эмоциональном разряде – суперсистема занимает эфферентные пути подсистемы и устанавливает необходимый уровень давления прямо, минуя афферентный синтез барорецепторов. Подсистема может лишь сопротивляться чрезмерному росту давления.

Структурные образования, составляющие функциональную систему, обладают исключительно подвижной мобилизуемостью. Это дает возможность быть пластичными, внезапно менять архитектуру в поисках запрограммированного полезного результата.

Внутренняя. операциональная архитектура функциональных систем.

Функциональная система всегда гетерогенна. Она состоит из

определенного количества узловых механизмов, каждый из которых является специфическим (рис. 13). Решающая цель системного подхода вообще – обеспечить органическое единство в исследовательском процессе системного уровня функционирования с индивидуальной характеристикой каждого дробного элемента или механизма, принимающего участие в этом функционировании.

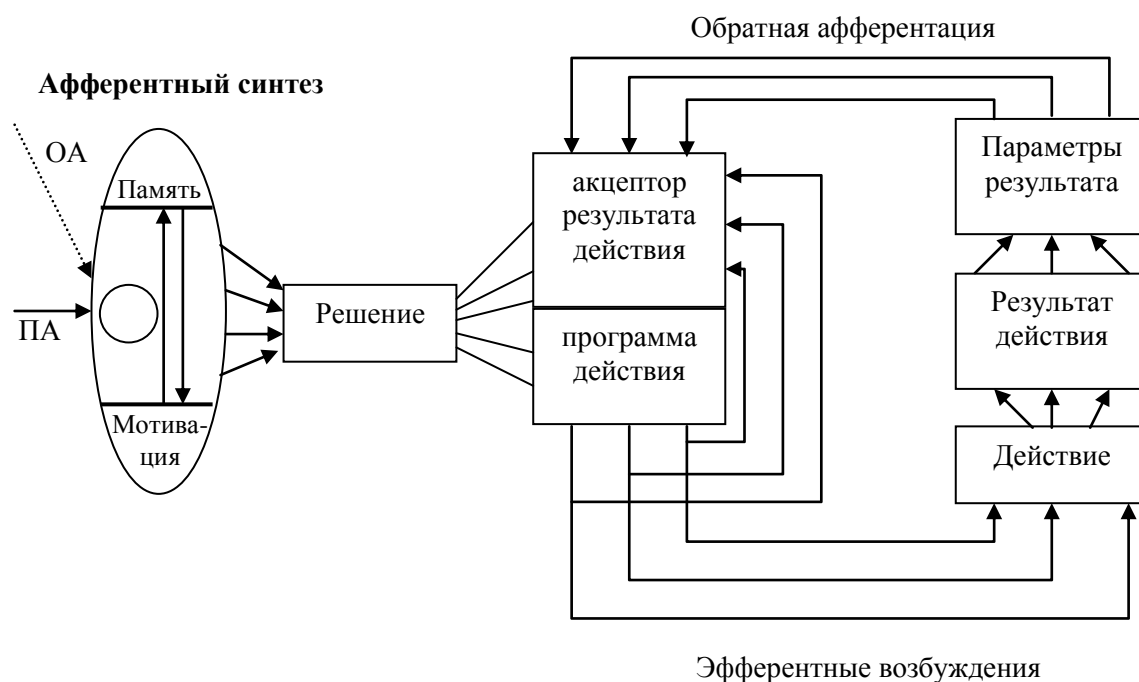


Рисунок 13. Структура функциональной системы. ОА – обстановочная афферентация, ПА – пусковая афферентация.

Отличие ТФС от всех системных моделей – наличие четко отработанной функциональной архитектоники. Непосредственный инструмент для практического применения. Система может стать методологическим принципом исследования и перебросить концептуальный мост от синтетических обобщений к аналитическим деталям только если она будет иметь четко очерченную, физиологически достоверную и логически оправданную внутреннюю архитектонику. Раскрывает тонкие механизмы, при помощи которых компоненты системы освобождаются от избыточных

степеней свободы.

#### Афферентный синтез.

Вопрос о результате в отличие от машин решается внутри функциональной системы на основе её внутренних процессов в стадии афферентного синтеза, а система затем строится под результат. 4 решающих компонента афферентного синтеза, которые должны быть подвергнуты одновременной обработке (одновременное взаимодействие на уровне нейронов): доминирующая в данный момент мотивация, обстановочная афферентация, пусковая афферентация, память. ПА – сигнал на выдачу реакции. Совокупность всех предварительных расчётов и соображений должна составить основу афферентного синтеза, приводящего к решению и выбору действия с наилучшим результатом (цели).

#### Принятие решения.

Один из самых интересных моментов в развёртывании системных процессов, полноценный участник процесса формирования системы. Афферентный синтез, подчиняясь доминирующей в данный момент мотивации, под коррекцией памяти, ведёт такой подбор возможных степеней свободы, при котором возбуждения избирательно направляются к мышцам, совершающим нужное действие. Когда и как происходит принятие решения о получении именно того, а не другого результата? Оценка возможных результатов при данной доминирующей мотивации происходит уже на стадии афферентного синтеза. Однако эти результаты не получаются реально – необходим выбор на основе длительной оценки различных, внутренне формирующихся результатов. Принятие решения – выбор наиболее подходящих степеней свободы в тех компонентах, которые должны составить рабочую часть системы. Эти степени свободы дают возможность экономно осуществить именно то действие, которое должно привести к запрограммированному результату. Много пока неясного. Возможностей движения – необозримое множество. Два важных вопроса: 1) Какие

механизмы производят отбор нужных в данный момент степеней свободы? 2) Локализация процесса обработки афферентной информации, сравнения ее с прошлым опытом и перевода на эфферентные пути для получения нужных результатов.

#### Формирование акцептора результатов действия.

«Предвосхищает афферентные свойства того результата, который должен быть получен в соответствии с принятым решением». Прогнозировать признаки необходимого в данный момент результата и сличать их с параметрами реального результата, информация о которых приходит благодаря обратной афферентации. Возможность исправить ошибку поведения или довести несовершенные поведенческие акты до совершенных. Циркуляция: результат – обратная афферентация – сличение и оценка реальных результатов в акцепторе результатов действия – коррекция – новый результат – и т.д.

Существенные признаки будущего результата динамически формируются благодаря многосторонним процессам афферентного синтеза с извлечением из памяти прошлого жизненного опыта и его результата. Складывается несколько возможных результатов, но они не выходят на эфферентные пути для реализации. Решение совершается после того, как произведен выбор наиболее адекватного результата по отношению к данной доминирующей мотивации. Афферентная модель будущего результата – эталон оценки обратных афферентаций – вплоть до получения запрограммированного результата.

#### Заключение.

Главный смысл СП состоит в том, что любая деталь наблюдения или экспериментирования должна быть неизбежно вписана в какой-то из узловых механизмов внутренней архитектоники системы. Никакая новая научная тема не может быть сформирована вне конкретной архитектоники. Трактовка полученных результатов даст наибольший эффект, если она будет построена

на основе системных механизмов. Для конкретного исследователя не может быть «возбуждения вообще», «афферентации вообще», «мотивации вообще», «памяти вообще». Конструктивная роль этих понятий выявляется благодаря их положению в том или ином качественно своеобразном механизме внутренней архитектоники ФС. Например, зрительная афферентация может быть пусковой (условный зрительный стимул), обстановочной (для предпусковой интеграции нервных процессов) или выполнять оценку полученного результата.

Можно применить ТФС для оценки изменения психической деятельности человека (например, после операций на мозге). Изменился ли афферентный синтез? Может ли принять адекватное решение? Или нарушен завершающий механизм: оценка результатов в акцепторе (повторные выполнения).

## **9. Психология и нейрофизиология – история взаимодействия**

В последние 100 лет для психологии и биологии (в основном – нейрофизиологии) были характерны попеременные движения навстречу друг другу и в разные стороны. Открытие Дарвином (середина XIX века) преемственности между поведением животных и человека подсказало ему, что поведение человека можно успешно изучать, используя его более простые аналоги у животных. Широкий оптимизм относительно способности нейрофизиологии соотносить механизмы мозга с поведением. Преждевременно. Не оправдалось. Разочарование и отдаление. Какое-то время разделение было полезно для психологии. Позволило систематически описать поведение, что невозможно было сделать на основе неясных корреляций с нервными механизмами. Скиннер: «... для демонстрации нейрофизиологических коррелятов необходимо строгое описание на уровне поведения. Открытие нейрологических фактов может происходить независимо от науки о поведении, если эти факты непосредственно

наблюдаются как структурные и функциональные изменения в ткани; но прежде чем можно будет показать, что такой-то факт ответственен за изменение поведения, и этот факт, и поведение должны быть количественно описаны и д.б. продемонстрировано соответствие между ними в отношении всех их особенностей.»

Дарвин осознал, что поведение имеет биологическую основу и утверждал, что определённые типы поведения – инстинкты – передаются по наследству и поэтому подвержены такому же давлению естественного отбора, как и морфологические признаки. Поэтому: «Различия в разуме между человеком и высшими животными, как бы велики они ни были, определённы есть различия в степени, но не в роде. Мы видим, что чувства и интуиция, различные эмоции и способности, такие, как любовь, память, внимание, любопытство, подражание, благоразумие и т.д., составляющие предмет гордости человека, в зачаточном, а иногда и хорошо развитом виде могут быть обнаружены у более низкоорганизованных животных.» 1871 г. Радикальная позиция. Коллега Дарвина зоолог Георг Романес: «Если мы наблюдаем муравья или пчелу, по всей видимости выражающих сострадание или гнев, мы должны либо заключить, что они находятся в психологическом состоянии, напоминающем сострадание или гнев, либо вообще отказаться думать об этом предмете...» 1883 г. Интроспекционизм. Оппозиция – объективная психология или экспериментальный бихевиоризм. Жан Анри Фабр. Заменял субъективные интерпретации тщательными наблюдениями. Открыл стереотипные формы поведения (комплексы фиксированных действий) у насекомых, представлял их как бездумные биологические машины. Дженнингс: «... но когда речь идёт о низших организмах, наблюдение и эксперимент – единственные прямые способы изучения поведения. Мы можем рассуждать об их поведении и по аналогии мы, возможно, придём к заключению, что им тоже присущи состояния сознания. Однако рассуждения по аналогии при последующей проверке наблюдением и

экспериментом часто оказываются ошибочными; поэтому там, где их нельзя проверить, мы не должны доверять им.» Для Лёба, например, поведение было цепью реакций, непосредственно возбуждаемых и контролируемых сенсорными стимулами. Бихевиористский подход был сильно развит Эдуардом Торндайком и И.П. Павловым – две модельные системы (парадигмы) – инструментальный и классический условные рефлексы. Торндайк: прежде чем поднять задвижку, кошка – ряд попыток, проб и ошибок. После нескольких сеансов – время поиска уменьшается. Важно подкрепление. Обучение быстрее, если вознаграждаются правильные действия («закон эффекта») – лежит в основе выработки инструментальной условной реакции. Есть перенос приобретённого навыка – тренировка в выполнении одних операций улучшает выполнение сходных. Павлов: слюноотделение у собак – вход служителя, а не пища. Неэффективный сам по себе стимул (условный раздражитель) должен появляться в сочетании с эффективным стимулом (безусловный раздражитель). После повторения таких сочетаний в определённой временно'й последовательности условный раздражитель приобретает способность вызывать условную реакцию. После выработки рефлекса реакцию вызывает и один условный стимул. Однако при повторениях без подкрепления – угасает. Классический условный рефлекс – вторая важная парадигма научения.

В инструментальном рефлексе связаны реакция животного и подкрепляющий стимул, а в классическом – 2 стимула, условный и безусловный (подкрепляющий). В отличие от инструментального рефлекса, при выработке которого правильные реакции непосредственно ведут к получению стимула (подкрепления), при выработке классического условного рефлекса экспериментатор предъявляет животному второй (безусловный) стимул через некоторое фиксированное время после предъявления условного стимула. Таким образом, предъявление безусловного стимула при выработке классического условного рефлекса не связано непосредственно с реакцией:

условный рефлекс образуется и тогда, когда безусловная реакция животного подавлена (скажем, временный паралич мышц).

Взаимоотношения между классическим и инструментальным (оперантным) условными рефлексами трудно анализировать с помощью поведенческих методик. Две взаимосвязанных парадигмы научения, основанных на общем принципе ассоциации. Связали старую концепцию научения путём ассоциаций с новой концепцией рефлекторного акта. Торндайк и Павлов отвергли недоступную для наблюдения психологическую конструкцию «мысль» в пользу наблюдаемой поведенческой конструкции «рефлекторная дуга». Решительный сдвиг в сторону бихевиористической теории научения.

Павлов (и Гретер) также нашли 2 неассоциативных типа изменения поведения: это габитуация и сенситизация.

Габитуация: уменьшение силы последовательных рефлекторных реакций, вызываемых повторными раздражениями. Реактивность восстанавливается только спустя определённое время, в течение которого раздражитель не предъявляется. Но неожиданный или сильный раздражитель (другой!) тотчас восстанавливает рефлекторную реактивность (дегабитуация).

Сенситизация: усиление реакции на раздражитель в результате предъявления другого, сильного или повреждающего. От предшествующего сочетания раздражителей последний не зависит. «Пуганая ворона куста боится.»

В природных условиях рефлекторные действия составляют лишь часть поведения животного. В поведенческом репертуаре животных имеются также целенаправленные реакции, которые менее очевидно связаны с внешними раздражителями и могут возникать в отсутствие явного направляющего стимула. Такое поведение называется инстинктивным и включает стереотипные двигательные реакции, свойственные всем особям



данного вида (данного пола). Различие между рефлекторным и инстинктивным поведением было определено этологами. Крейг → Многие сложные поведенческие последовательности включают два компонента: 1) рефлекторный направляющий, состоящий из различных поисковых и ориентировочных движений, и 2) следующий за ним стереотипный компонент, состоящий из фиксированных действий. Ориентировочное поведение легко видоизменяется под влиянием научения, тогда как последовательность фиксированных действий имеет тенденцию к инвариантности, меньше модифицируется научением.

Открытие комплекса фиксированных действий позволило выделить новую единицу поведения. Различие рефлекторных и фиксированных действий – значительная часть поведения относится к этим двум категориям. Простые рефлекторные действия – градуальная функция интенсивности возбуждающего стимула (как правило). Фиксированные действия обычно градуально не связаны с интенсивностью стимула (пороговая связь). Для фиксированных действий, по мнению Лоренца, последовательность движений определяется механизмами ЦНС (центральная программа) и не требуется ОС (иная функция!) для правильного поведения. Лоренц предположил, что комплексы фиксированных действий наследуются. Реально они часто варьируют по интенсивности и полноте завершения. Отдельные их компоненты требуют для своего осуществления определённых факторов среды. Несмотря на исключения, основная концепция Лоренца полезна и сегодня: о центральной программе, о стереотипности, о генетической предопределённости комплексов фиксированных действий.

Тонкости и исключения есть и в рефлекторной теории. «Зацеплено» только ядро – реальность сложнее. Ещё 3 парадигмы научения. 1) Латентное научение – научение без видимого вознаграждения, когда животное, например, знакомится с обстановкой. 2) Сенсорное предобусловливание – сенсорный стимул вызывает реакцию, но он не сочетался с безусловным, а

только с другим условным (который сочетался с безусловным). 3) Импринтинг – мгновенная (и необратимая) выработка рефлекса.

Противоборствующие тенденции привели к переоценке методов и результатов исследований поведения. Экспериментальная психологи в основном изучали научение, пренебрегая всем остальным. Научение приравнивалось к выработке условных связей, а неассоциативные модификации отвергались. Точнее, модификации поведения, лежащие вне парадигм ассоциативного научения, считались неинтересными и несущественными. Для этологов же научение было только частью поведения и они понимали его более широко. Поэтому этологи смогли исследовать и привыкание, и сенситизацию, и импринтинг, и их важную роль в некоторых адаптивных процессах. Причём влияние этологии на психологию не было односторонним. Экспериментальные психологи привнесли в этологические исследования строгую методологию и заботу о научной достоверности.

Конфликт разрешился и возникли новые силы. Современные бихевиористы уже хотят знать о соотношении поведенческих процессов. Поскольку это уже не просто стимул-реакция, но связано и с внутренними процессами, а видимая связь стимула и реакции есть лишь верхушка айсберга. Внутренние (непосредственно не наблюдаемые) факторы, образующие цепь событий между стимулом и реакцией, называются промежуточные переменные. «Некоторые психологи считают, что каждую промежуточную переменную надо интерпретировать в нейрофизиологических терминах. Только поведенческие методики не дают ответа на ряд вопросов. Нужны биологические корреляты – для строгости и лучшего использования. Как взаимодействуют врождённые, онтогенетические и внешние факторы при выборе формы поведения?» [Э. Толмен, 1932]

Один из разделов психологии – физиологическая психология – давно стремится к биологическому пониманию поведения. Правда, есть серьёзные

сомнения насчёт близкого будущего. «... одной из причин было некоторое разочарование относительно прогресса в нейроанатомии и нейрофизиологии, после того как доктрина локализации была разбита по многим направлениям ... Если никто по-настоящему не знал, как работает мозг, то какую помощь могла оказать нейрофизиология теоретикам научения?» [Эрнст Хилгард, 1956] Сейчас произошли большие изменения в науках о нервной системе, разработаны мощные аналитические методы на клеточном уровне, но дальше – по-прежнему проблемы.

Ясно одно. Поведенческие методики необходимы, но недостаточны для анализа механизмов поведения, точно так же и клеточные методики необходимы, но недостаточны для понимания роли нейронов в целостных проявлениях активности животного.

## **10. Управление движением в биосистемах**

Начало научного подхода – рефлекторная теория.

Николай Александрович Бернштейн, великий русский физиолог, – принципиальный шаг вперед, коренной переворот взглядов. Его книга «О построении движений» во многих отношениях опередила Винеровскую кибернетику. Сам Бернштейн склонялся к концепции рефлекторного кольца, но, чувствуя ограниченность этой версии, развивал представления о целеполагании, о различиях реакций и акций. Он сформулировал основные принципы управления движениями.

1) Управление движениями осуществляется с помощью интеграции большого числа систем. Включаются – системы обработки сенсорной информации (о внешнем мире и исполнительных устройствах), системы памяти (о нормативах внешнего мира и правилах поведения), системы оценочных функций (ситуация – повеление), системы отбора и синтеза двигательных программ, исполнительные системы.

2) Существуют иерархически соподчиненные отношения между

подсистемами.

3) Местом интеграции является кора головного мозга.

4) Общим принципом работы мозга можно считать то, что он является и управляющей (относительно собственных исполнительных устройств) и управляемой (через сенсорные входы) системой.

5) Способ управления подразумевает возможность текущей оценки состояний эффекторов, сопоставление её с ожидаемым результатом или с программой, уточнение и коррекцию.

6) Движение не запоминается, а каждый раз строится (синтезируется) «блочным» методом.

Один из важнейших моментов здесь – концепция кольцевого управления. Суть концепции состоит в необходимости непрерывного поступления сенсорных сигналов для нормального хода процесса управления. «... сенсорное обеспечение двигательных реакций рассматривается как сложный комплекс «пусковых» (осуществляющих запуск готовых форм), «внепусковых» (определяющих пространственные характеристики ответа), «коорекционных» (сигнализирующих об ошибке и определяющих выбор поправочной активности) и «оценочных» (информирующих о результате действия) афферентаций.» (из Козловской И.Б.) Образуется своего рода сервомеханизм, в котором главенствующую роль играет проприорецепция.

Есть ещё ряд работ, которые трудно однозначно отнести к какой-то из концепций. В работах Бернштейна и его последователей встречаются идеи, относящиеся и к кольцевому управлению, и к фиксированным двигательным актам. Объяснить это можно тем, что в единой СУ движениями используются оба механизма управления – и кольцевой, и программный. Не только разные движения – в зависимости от целей, условий и возможностей – могут управляться разными механизмами, но и в одном движении могут присутствовать черты разных типов управления. Большинство движений

организуется одновременно кольцевым и программным механизмами.

Как же может строиться сложное движение, координируемое в реальном времени разными сенсорными системами? У Бернштейна впервые появляется **синергия** – как действие, автономно выполняемое временным объединением элементов двигательного аппарата (функциональная синергия). Далее – цепь развивающих работ учеников и последователей. Рассмотрим современную трактовку понятия синергия. Синергиями принято называть такие классы движений, которые имеют близкие кинематические характеристики, совпадающие активные мышечные группы и ведущие афферентации. Каждой синергии свойственны определенные связи, накладываемые на некоторые мышечные группы, разбиение всех участвующих в движении мышц на небольшое число связанных групп. Можно выделить сравнительно простые синергии сохранения позы, циклические локомоторные синергии (ходьба, бег, плавание и т.д.), синергии броска, удара, прыжка и небольшое количество других. Естественно предположить, что обучение движению и состоит в выработке соответствующей синергии. В организме есть также система взаимодействия мышц-антагонистов, действующих на один и тот же сустав, система постуральных реакций, использующая фиксированную систему взаимодействия разного рода рецепций (в т.ч. проприоцептивной шеи и конечностей), а также важный механизм выработки временных связей. Основные синергии и перечисленные простейшие нейрофизиологические механизмы образуют «словарь движений» и лишь в исключительных случаях возникает потребность в его обогащении.

Синергия представляется здесь в качестве некоего функционального блока, составляющего основу механизма управления движениями. Как основной принцип работы биологических СУ предлагается принцип наименьшего взаимодействия. Состоит он в том, что сложная многоуровневая система управления рассматривается как совокупность

подсистем, обладающих относительной автономией. Каждая из них имеет «личную» задачу, состоящую в уменьшении взаимодействия с «внешней средой», последняя состоит из среды, внешней по отношению ко всей системе, и из остальных подсистем. Всё это может быть иерархизировано.

В управлении движениями организованность проявляется прежде всего в том, что для каждого двигательного акта можно выделить относительно небольшое число ведущих эффекторных параметров и определить основную афферентацию, необходимую для реализации движения. Стремление к такому упрощению является также проявлением принципа наименьшего взаимодействия.

В рамках «синергийного» подхода рассмотрены функции мозжечка в управлении движениями /Аршавский, Гельфанд, Орловский/. Двигательное поведение животных определяется ограниченным набором синергий (программ), каждая из которых может быть включена довольно простой командой. Удаление мозжечка не приводит к выпадению какого-либо класса движений; наблюдается лишь нарушение движений. На основе экспериментальных данных и системных представлений авторы приходят к выводу, что мозжечок координирует работу разных двигательных синергий и приспособливает работу синергий к внешним условиям. Вообще говоря, синергия решает 3 задачи: ● генерирует заданное движение, ● адаптирует его к условиям среды, ● взаимодействует с другими синергиями. Ряд задач решается на уровне самой синергии, но некоторые задачи требуют участия других рецепторов – например, учета положения тела или препятствия. Можно было бы связать синергии напрямую, но по мере увеличения числа движений связи усложняются. Проще создать специальный орган – мозжечок.

Обратите внимание, синергия как организационный принцип позволяет вроде бы объяснить все – и возможность синтеза движения в реальном времени (блоки), и «стандартность», «заученность» движений, и их

вариабельность при изменениях ситуации.

В работе Покровского, Игнатьева, Кана проводятся аналогии между лингвистической структурой языка (трансформационная модель языка) и структурой биологической СУ движениями. Они основываются на том, что в СУ движениями не могут быть запрограммированы все возможные двигательные акты – не хватает объёма памяти. В нервной системе живого организма происходит оценка состояния внешней среды, определение желаемого конечного результата двигательного акта и построение, каждый раз заново, двигательного акта. Кратко – трансформационная модель языка. На базе основных правил строятся простейшие (или ядерные) предложения языка. Более сложные предложения получаются путём применения трансформационных правил к ядерным предложениям или к предложениям, полученным в результате трансформаций. Обучение движению происходит аналогично обучению языку. Вначале ребёнок совершает неуверенные, некоординированные акты. Постепенно его движения упорядочиваются, становятся уверенными, целенаправленными. Таким образом, в организме создаётся своего рода теория (грамматика) движения, которая в дальнейшем используется на протяжении всей жизни. По аналогии с трансформационной моделью языка можно считать, что в процессе обучения движению биологический объект овладевает грамматикой движений, состоящей из 2-х компонент: 1) конечной последовательности основных правил, позволяющих строить основные (ядерные) движения; 2) конечной последовательности трансформационных правил, с помощью которых образуются более сложные движения. Т.е. можно считать, что управляющее устройство состоит из двух «механизмов». Один позволяет строить небольшое число основных (ядерных) движений, другой, применяя трансформации к ядерным движениям и комбинируя ядерные движения и движения, полученные в результате трансформаций, позволяет строить двигательные акты любой сложности. Такой подход позволяет привести чрезвычайно сложную

структуру СУ движениями к обозримому виду.

В качестве ядерных движений можно рассматривать функциональные синергии, а сложный двигательный акт будет представлять собой комплекс синергий. Тогда при выполнении двигательного акта высшему управляющему устройству нет необходимости управлять всеми независимыми переменными, ему достаточно управлять лишь ограниченным числом некоторых обобщённых переменных (синергиями). При этом задача управления заметно упрощается. А в памяти СУ движением хранится лишь конечное число основных правил и конечное число трансформационных правил, с помощью которых может быть построено большое число двигательных актов.

Идеологически близок к структурно-лингвистическому подход Юревича и Радченко. Хотя они и рассматривают управление роботами, но проводя аналогии с двигательным поведением животных.

3 поколения роботов. В роботах 1 поколения участие человека ограничивается «обучением». Непосредственная запись афферентных сигналов, воспроизведение записанных сигналов реализуется СУ как повторение заученных операций.

Роль мозга в формировании поведения животного сводится к преобразованию одного многомерного импульсного текста в другой, в общем случае меньшей размерности (т.н. воронка Шеррингтона). Это можно трактовать как перевод с одного языка (афферентного) на другой (эфферентный). Ошибки «перевода» – неадекватность поведенческих реакций. Поведение животного в незнакомой обстановке, образованной вообще говоря известными элементами, подобно переводу незнакомого текста с известным словарным составом. Гибкость и адекватность поведенческих реакций здесь эквивалентны связному и безошибочному лингвистическому переводу. Проблема создания роботов 3 поколения заключается в том, чтобы обеспечить ассоциативную связь между входной и



выходной информацией, осуществить технически адекватный перевод заранее неизвестного афферентного импульсного текста в эфферентный. Мозг человека и животных легко обеспечивает такую ассоциативную связь, хотя и с разной степенью адекватности. Но как осуществить такую афферентно-эфферентную связь техническими средствами – неясно. Поэтому в роботах 2 поколения отказываются от обучения, от записи эфферентных текстов и афферентно-эфферентное преобразование реализуют алгоритмически, перерабатывая сенсорную информацию с помощью ЭВМ. Однако с возрастанием входной информации задачи алгоритмического обеспечения усложняются не пропорционально (экспоненциальная зависимость). В результате требуется слишком много машинного времени и работа оказывается невозможной (в реальном времени). Существует информационный барьер, который для роботов 2 поколения принципиально непреодолим. Сравнивая роботов 1 и 2 поколений, необходимо отметить, что адаптивные свойства последних даются большой ценой. Вместо записи эфферентного текста его приходится синтезировать алгоритмическими методами. Это намного сложнее, поэтому синтезированные двигательные реакции роботов 2 поколения намного беднее. Для роботов 3 поколения – возврат к обучению, но на другом уровне. Роботы 3 поколения, как и 1, рассчитаны на жёстко организованную среду. Но для 1 – всё жёстко определено, вся информация о предметах и перемещениях известна заранее и используется при обучении. Для 3 поколения среда организована в другом смысле: описывающие её сенсорные потоки должны допускать разделение на фрагменты такие, чтобы с их помощью было возможно описание других сцен. Набор таких фрагментов – словарь по лингвистической терминологии – должен обеспечить возможность достаточно точного – с точностью до опознания – описания любой сцены. Это даёт возможность во всех ситуациях говорить об организованной среде. Трудность создания таких автоматов состоит в том, что афферентные тексты при обучении и воспроизведении как

правило не совпадают. Поэтому к автомату предъявляется требование воспроизводить записанные эфферентные тексты, базируясь на неточном воспроизведении афферентных текстов. В лингвистической аналогии – автомат должен осуществлять пословный опознающий перевод с неточного афферентного языка на эфферентный. При этом могут правильно переводиться незнакомые тексты с тем же словарным составом, что хорошо имитирует гибкое адекватное поведение животных в незнакомой обстановке.

## 11. Алгоритмическое управление движением

Механика человека изучает его целенаправленные движения. Ещё Ньютон поставил вопрос: «Каким образом движения тел следуют воле?» Воля – способность сосредоточивать свои усилия на заранее поставленной цели. Движения, следующие воле (преследующие достижение некоторой цели) – целенаправленные. Естественные – без цели.

### Предпосылки механики управляемого тела.

① Если человек хочет управлять движением, то он должен поставить цель.

② Движение объектов, которыми нужно управлять, подчиняется законам механики.

③ Для достижения цели необходимо использовать объективные законы и **в соответствии** с ними принудительно изменять естественное движение.

Положение свободного твёрдого тела в пространстве определяется 6 обобщёнными координатами. Например – 3 координаты ЦМ и 3 угла (углы Эйлера, скажем). Необходимое число обобщённых координат  $\equiv$  число степеней свободы! Уравнения движения – это уравнения, в которых обобщённые координаты есть неизвестные функции времени.

Гипотеза: всякая цель движения может быть выражена в виде уравнений, связывающих обобщённые координаты управляемого объекта. Уравнения, при помощи которых формулируется цель движения, называются

**программой движения.** (Коренев: «Математическое выражение воли человека в части, касающейся управления движением.») Программа может быть неполной. Например, точке (3 обобщённых координаты в пространстве) необходимо находиться на некоторой поверхности. Само уравнение поверхности  $f(x_1, x_2, x_3, t) = 0$  будет программой. Удобнее (если возможно) выразить из этого уравнения одну координату через другие и время  $x_1 = \Phi(x_2, x_3, t)$ , здесь  $x_2$  и  $x_3$  могут быть почти произвольными функциями времени. Другой пример – пусть точке надо попасть в начало координат:  $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = \sigma^2(t)$ , где  $\sigma(t)$  – произвольная убывающая к 0 функция времени.

Описание естественных движений состоит из кинематики (описывает ВОЗМОЖНЫЕ движения; для точки – произвольно) и динамики (описывает связь сил и движений). Динамическое описание опирается в основном на 2 закон Ньютона. Для определения целенаправленного движения необходимо добавить ещё управление. *Если бы естественные движения достигали цели, то управление было бы излишним.*

Принцип совместности. Для кинематики: из класса возможных движений надо выделить подкласс достигающих цели (или совместных с программой). Для динамики: чтобы получить совместные с программой уравнения динамики, надо ввести дополнительные управляющие (или программные) силы.

Есть разные способы сделать это. Рассмотрим один на примере плоской трёхзвенной модели руки.

Программирование плоскопараллельного движения модели руки.

Кинематическая схема (рис. 14). (Везде далее – для сокращения записей!! – если у величины 2 индекса, то *первый* – номер звена, *второй* – номер координаты.)

Пусть центры масс (ЦМ) находятся в серединах звеньев (запись проще и ничего принципиально не меняет). То есть  $L_1 = 2 \cdot l_1$ ,  $L_2 = 2 \cdot l_2$ ,  $L_3 = 2 \cdot l_3$ . Соединим звенья между собой – получим 4 уравнения связей,

показывающие, что определённые (соединённые, крайние) точки звеньев всегда совпадают. Исходно 3 звена имели 9 степеней свободы, из уравнений связей  $9 - 4 = 5$ . То есть 3-звенник на плоскости имеет 5 степеней свободы. Но если точка начала первого звена неподвижна и (для удобства, поскольку это не важно) находится в начале координат, то мы имеем ещё 2 уравнения и «теряем» ещё две степени свободы – остаётся ТРИ (рис. 15). Исходные 9 координат  $x_{\mu}$  и  $\varphi_{\mu}$ , соответствующие исходным 9 степеням свободы, называются теперь **опорные координаты**. 3 из них (какие мы выберем), соответствующие оставшимся степеням свободы, называются **обобщёнными координатами**.

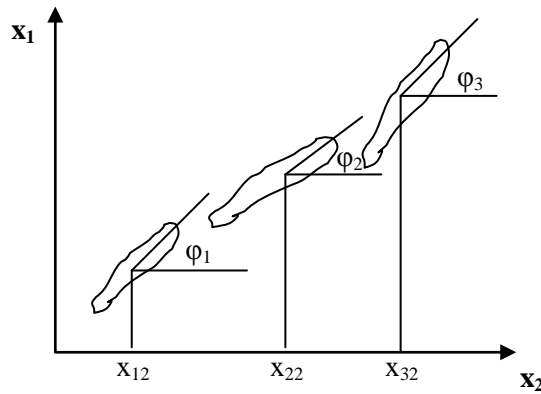


Рисунок 14. Три твердых тела на плоскости.

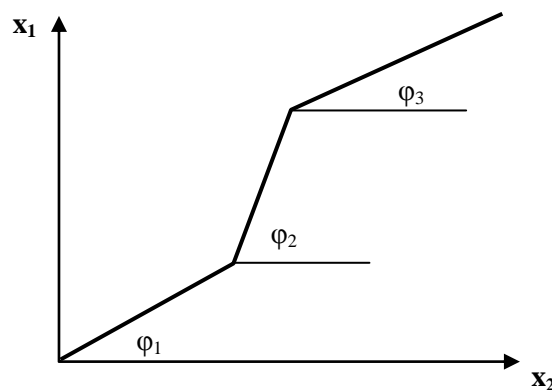


Рисунок 15. Трёхзвенник на плоскости.

Итак, мы имеем 6 уравнений связей и можем из них выразить 6 опорных координат через 3 остальных (они при этом станут обобщёнными

координатами) – например,  $x_{\mu i}$  через  $\varphi_{\mu}$ .

$$\begin{cases} x_{11} + l_1 \cdot \sin \varphi_1 = x_{21} - l_2 \cdot \sin \varphi_2, \\ x_{12} + l_1 \cdot \cos \varphi_1 = x_{22} - l_2 \cdot \cos \varphi_2, \\ x_{21} + l_2 \cdot \sin \varphi_2 = x_{31} - l_3 \cdot \sin \varphi_3, \\ x_{22} + l_2 \cdot \cos \varphi_2 = x_{32} - l_3 \cdot \cos \varphi_3, \\ x_{11} - l_1 \cdot \sin \varphi_1 = 0, \\ x_{12} - l_1 \cdot \cos \varphi_1 = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{11} = l_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ x_{12} = l_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ x_{21} = 2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin \varphi_2, \\ x_{22} = 2 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_2 \cdot \cos \varphi_2, \\ x_{31} = 2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3, \\ x_{32} = 2 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3. \end{cases}$$

Это и есть уравнения кинематики плоской трёхзвенной модели руки с закреплённой точкой.

Можно ставить 3 типа задач: 1) определённое движение концевой точки, 2) определённая ориентация звеньев, 3) 1 + 2. Например, преследование концевой точкой E (external) целевой точки A (рис. 16).  $x_{E1} = 2 \cdot (l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3)$ ,  $x_{E2} = 2 \cdot (l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3)$ . Достаточно задать неполную программу:  $2 \cdot (l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3) = x_{A1} - \sigma \cdot \cos \delta$ ,  $2 \cdot (l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3) = x_{A2} - \sigma \cdot \sin \delta$ , где  $\sigma(t) \rightarrow 0$ . Но неполную программу для определённости придётся дополнить ещё каким-то требованием, скажем, на ориентацию какого-то угла.

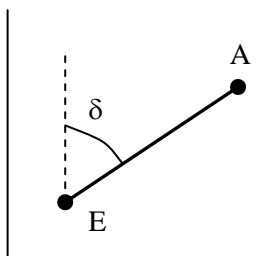


Рисунок 16. Задание программы движения.

#### Динамика естественного движения.

Приведение к центру масс всех приложенных к твёрдому телу сил (рис. 17) – стандартный ход в динамике. Вместо любой системы сил  $f_i$  мы получаем главный вектор силы  $F$  и главный момент  $M$ . При этом пользуются принципом «динамического нуля» – приложение в любой точке твёрдого тела двух равных по величине и противоположно направленных сил НИКАК

не меняет движение тела.

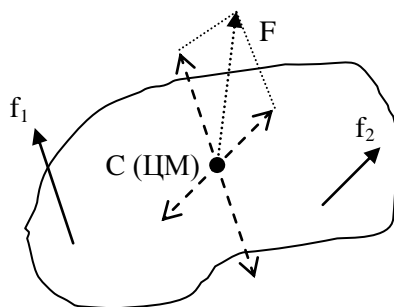


Рисунок 17. Приведение к центру масс приложенных к твёрдому телу сил.

Далее «в дело» вступают две основные теоремы динамики.

1. Производная по времени количества движения тела равна главному вектору системы приложенных к телу сил.
2. Производная по времени момента количества движения равна главному моменту системы приложенных сил.

Для одного тела:  $m \cdot x_1'' = F_1$ ,  $m \cdot x_2'' = F_2$ ,  $I \cdot \varphi'' = M$ , где  $F_1$  и  $F_2$  – проекции главного вектора силы на оси,  $I$  – момент инерции тела относительно оси, проходящей через ЦМ (рис. 18).

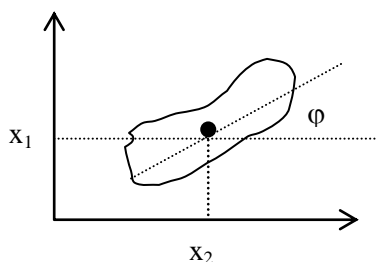


Рисунок 18. Твёрдое тело на плоскости.

Для несвязанного трёхзвенника – три таких набора, для связанного добавляются силы реакции  $\mathbf{G}$  (рис. 19). Силы реакции  $\mathbf{G}$  также надо привести к ЦМ, тогда получим в каждом звене главный вектор сил реакции  $\mathbf{R}_i$  и главный момент реакции  $\mathbf{L}_i$ .

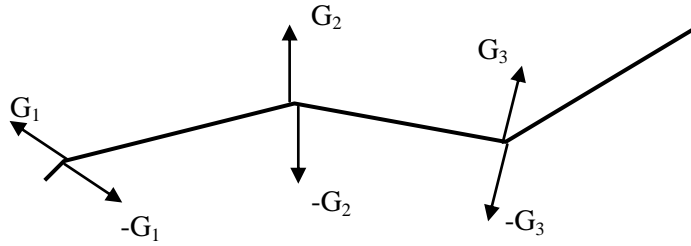


Рисунок 19. Три связанных твердых тела на плоскости.  $G_i$  – силы реакции.

Уравнения динамики запишутся так:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{x}''_{11} &= \mathbf{F}_{11} + \mathbf{R}_{11}, & \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{x}''_{12} &= \mathbf{F}_{12} + \mathbf{R}_{12}, & \mathbf{I}_1 \cdot \varphi''_1 &= \mathbf{M}_1 + \mathbf{L}_1, \\
 \mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{x}''_{21} &= \mathbf{F}_{21} + \mathbf{R}_{21}, & \mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{x}''_{22} &= \mathbf{F}_{22} + \mathbf{R}_{22}, & \mathbf{I}_2 \cdot \varphi''_2 &= \mathbf{M}_2 + \mathbf{L}_2, \\
 \mathbf{m}_3 \cdot \mathbf{x}''_{31} &= \mathbf{F}_{31} + \mathbf{R}_{31}, & \mathbf{m}_3 \cdot \mathbf{x}''_{32} &= \mathbf{F}_{32} + \mathbf{R}_{32}, & \mathbf{I}_3 \cdot \varphi''_3 &= \mathbf{M}_3 + \mathbf{L}_3.
 \end{aligned}$$

Если продолжать запись дальше, то очень быстро её придётся мерить километрами. Поэтому в механике вводят индексную запись ( $\xi$  – дзета,  $\eta$  – эта,  $\nu$  – ню,  $\mu$  – мю,  $\lambda$  – лямда). Три принципа. 1 – каждой группе объектов ставится в соответствие одна буква с индексами. Конкретно:

9 опорных координат – буква  $\xi$ , приведённые внешние силы и моменты – буква  $\mathbf{X}$ ,

$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{31}$	$F_{32}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\xi_5$	$\xi_6$	$\xi_7$	$\xi_8$	$\xi_9$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$

приведённые силы и моменты реакции – буква  $\mathbf{Z}$ , массы и моменты инерции – буква  $\mathbf{b}$ , причём все  $\mathbf{b}_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ .

$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{21}$	$R_{22}$	$R_{31}$	$R_{32}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$m_1$	$m_1$	$m_2$	$m_2$	$m_3$	$m_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{44}$	$b_{55}$	$b_{66}$	$b_{77}$	$b_{88}$	$b_{99}$

2 – скользящие индексы – если индексная буква встречается в записи

только сверху  $X^i$  или только снизу  $X_j$ , то это означает, что записано сразу много уравнений и эта буква «пробегаёт» все свои значения.  $\underline{\mathbf{z}}$  – свёртка – если индексная буква встречается в записи и сверху и снизу, то это означает сумму по всем возможным значениям этого индекса. Теперь с учётом всего этого все 9 уравнений динамики можно записать как  $\boxed{b_{pq} \cdot \xi^q = X_p + Z_p}$ , где  $\mathbf{p}$  пробегает значения от 1 до 9 (то есть записано 9 уравнений), а по  $\mathbf{q}$  идёт суммирование от 1 до 9. Внешние силы  $X_p$  считаем данными, тогда у нас есть 18 неизвестных –  $\xi_q$  и  $Z_p$ . При этом мы имеем 9 уравнений динамики и 6 уравнений кинематики – всего 15. Недостающие 3 получим чуть позже из аксиомы идеальности связей Лагранжа, а вначале преобразуем немного уравнения кинематики.

$$\begin{cases} \xi^1 = l_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ \xi^2 = l_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ \xi^3 = 2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin \varphi_2, \\ \xi^4 = 2 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_1 + l_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ \xi^5 = 2 \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3, \\ \xi^6 = 2 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3, \\ \xi^7 = \varphi_1, \\ \xi^8 = \varphi_2, \\ \xi^9 = \varphi_3, \end{cases} \Rightarrow \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} \eta^1 \\ \eta^2 \\ \eta^3 \end{vmatrix}.$$

Здесь для обобщённых координат введена новая индексированная буква  $\boldsymbol{\eta}$  (эта). Теперь мы можем записать все 9 вышеприведённых уравнений в виде одной индексированной строчки и, соответственно, так же и первую и вторую производные по времени от опорных координат.

$$\xi^p = \xi^p(\eta^\mu), \quad \dot{\xi}^p = \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\mu} \cdot \dot{\eta}^\mu, \quad \ddot{\xi}^p = \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\mu} \cdot \ddot{\eta}^\mu + \frac{\partial^2 \xi^p}{\partial \eta^\mu \partial \eta^\nu} \cdot \dot{\eta}^\mu \cdot \dot{\eta}^\nu,$$

здесь  $\mathbf{p}$  везде «скользящий» индекс ( $1 \div 9$ ), а  $\boldsymbol{\mu}$  во втором и третьем уравнениях и  $\boldsymbol{\nu}$  в третьем – индексы, по которым идёт суммирование ( $1 \div 3$ ).

Аксиома идеальности связей Лагранжа гласит: суммарная работа сил реакции на возможном перемещении равна нулю. Трением пренебрегаем, тогда силы попарно равны, противоположно направлены и приложены



фактически в одной точке. То есть при ЛЮБЫХ перемещениях  $Z_p \cdot d\xi_p = 0$ .

Но из вышеприведённого следует, что  $d\xi^p = \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\mu} \cdot d\eta^\mu$ , тогда при ЛЮБЫХ  $d\eta^\mu$

должно выполняться  $Z^p \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\mu} \cdot d\eta^\mu = 0$  (поскольку ни при каких изменениях

обобщённых координат связи не нарушаются!). А это может выполняться

при любых  $d\eta^\mu$  только при условии, что  $Z^p \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\mu} = 0$ .

Возьмём теперь индексное уравнение (9 уравнений!) динамики  $b_{pq} \cdot \xi^q = X_p + Z_p$  и произведём «хитрое» действие – умножение со свёрткой. Внешне это выглядит просто как умножение каждого элемента уравнения на одинаковый множитель  $\partial \xi^p / \partial \eta^\lambda$  (вот они – преимущества индексной записи!), но по сути мы должны для КАЖДОЙ из 3  $\lambda$  умножить все 9 уравнений на указанные множители со своим  $p$  для каждого уравнения и одинаковой  $\lambda$  и все 9 уравнений сложить. Поскольку  $\lambda$  принимает значения только 1, 2 и 3, получится всего 3 уравнения:

$$b_{pq} \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot \xi^q = \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot X_p + \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot Z_p.$$

Как следует из аксиомы идеальности связей, последнее слагаемое в этом уравнении  $\equiv 0$ . Тогда, с учётом вышеприведённого выражения для  $\xi^q$ , получим:

$$b_{pq} \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot \left( \frac{\partial \xi^q}{\partial \eta^\mu} \cdot \eta^\mu + \frac{\partial^2 \xi^q}{\partial \eta^\mu \partial \eta^\nu} \cdot \eta^\mu \cdot \eta^\nu \right) = \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot X_p,$$

где  $p$  и  $q$  принимают значения от 1 до 9, а  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\nu$  – от 1 до 3, причём «скольжение» идёт только по  $\lambda$ , а по остальным индексам – суммирование. Таким образом, мы получаем только 3 уравнения относительно 3 неизвестных  $\eta^\lambda$ . Введём следующие обозначения:

$$b_{pq} \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot \frac{\partial \xi^q}{\partial \eta^\mu} = c_{\lambda\mu}, \quad b_{pq} \cdot \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot \frac{\partial^2 \xi^q}{\partial \eta^\mu \partial \eta^\nu} = C_{\lambda,\mu\nu}, \quad \frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot X_p = Y_\lambda,$$

где  $c_{\lambda\mu}$  называется метрическим тензором пространства  $\eta^\lambda$ ,  $C_{\lambda,\mu\nu}$  – трёхиндексным символом Кристоффеля первого рода,  $Y_\lambda$  – обобщённой

внешней силой. Окончательно получим уравнение:

$$c_{\lambda\mu} \cdot \dot{\eta}^\mu + C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \dot{\eta}^\mu \cdot \dot{\eta}^\nu = Y_\lambda,$$

или в явном виде:

$$\begin{cases} c_{11} \cdot \phi_1 + c_{12} \cdot \phi_2 + c_{13} \cdot \phi_3 + C_{1,22} \cdot (\phi_2)^2 + C_{1,33} \cdot (\phi_3)^2 = Y_1, \\ c_{21} \cdot \phi_1 + c_{22} \cdot \phi_2 + c_{23} \cdot \phi_3 + C_{2,11} \cdot (\phi_1)^2 + C_{2,33} \cdot (\phi_3)^2 = Y_2, \\ c_{31} \cdot \phi_1 + c_{32} \cdot \phi_2 + c_{33} \cdot \phi_3 + C_{3,11} \cdot (\phi_1)^2 + C_{3,22} \cdot (\phi_2)^2 = Y_3. \end{cases}$$

Все остальные  $C_{\lambda,\mu\eta} = 0$ . Если «расписать» всё это в явном виде, текст займёт по крайней мере несколько страниц.

### Целенаправленное движение.

В дополнение к внешним силам и силам реакции мы должны ввести также управляющие силы и моменты. После приведения к центрам масс получим уравнения  $b_{pq} \cdot \xi^q = X_p + Z_p + S_p$ , где  $S_p$  вектор управляющих сил  $P_{1-6}$

и моментов  $N_{1-3}$ . Пройдём тот же путь и обозначим  $\frac{\partial \xi^p}{\partial \eta^\lambda} \cdot S_p = \Pi_\lambda$ , тогда

получим окончательные уравнения:

$$c_{\lambda\mu} \cdot \dot{\eta}^\mu + C_{\lambda,\mu\nu} \cdot \dot{\eta}^\mu \cdot \dot{\eta}^\nu = Y_\lambda + \Pi_\lambda.$$

Обобщённые управляющие силы выражаются здесь через проекции приведённых к ЦМ сил и моментов управления:

$$\begin{cases} \Pi_1 = (P_{11} + 2 \cdot P_{21} + 2 \cdot P_{31}) \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_1 - (P_{12} + 2 \cdot P_{22} + 2 \cdot P_{32}) \cdot l_1 \cdot \sin \varphi_1 + N_1, \\ \Pi_2 = (P_{21} + 2 \cdot P_{31}) \cdot l_2 \cdot \cos \varphi_2 - (P_{22} + 2 \cdot P_{32}) \cdot l_2 \cdot \sin \varphi_2 + N_2, \\ \Pi_3 = (P_{31} \cdot \cos \varphi_3 - P_{32} \cdot \sin \varphi_3) \cdot l_3 + N_3. \end{cases}$$

И это уже ВСЁ, что могут дать нам кинематика и динамика! Теперь мы можем задать управляющие силы и найти соответствующее им движение  $\eta^\mu(t)$ , либо наоборот – задать требуемое движение и найти требуемые для этого управляющие силы  $\Pi_\lambda(t)$ . Но обобщённые силы  $\Pi$  не есть собственно силы. У нас есть всего 3 уравнения для нахождения 9  $S_p$ . Это конструктивная неопределённость, и чтобы снять её надо задать конкретный способ генерации сил. Например.

- 1) Реализация движения одними парами сил (моментами). Не

свойственно живым системам, но возможно для роботов с сервомоторами в осях вращения звеньев. Неплохо в управлении, но ненадёжно и не даёт большой мощности. В этом случае  $S_{1-6} \equiv 0$   $N_i = P_i$ .

2) Управление при помощи внутренних сил. То есть сил, действующих по линиям, связывающим ЦМ звеньев. Тогда все моменты = 0,  $S_{7-9} = 0$ . Поскольку силы внутренние,  $S_1 + S_3 + S_5 = 0$  и  $S_2 + S_4 + S_6 = 0$ . Надо ещё одно дополнительное условие (произвольное) для доопределения реальных управляющих сил.

3) Управление с помощью «модели мышечного аппарата». Вообще-то подойдёт любое конкретное расположение приводов. Задать места крепления и направления тяг, это даст необходимый набор связей между проекциями.

## 12. Организация простого движения в биосистемах

Понятно, что алгоритмическое управление в реальном времени абсолютно невозможно для живого. Как же реально может происходить такое управление в биосистемах? При управлении движением необходимо решить 3 уровня задач: 1) Реализация движения, 2) Организация многозвенного движения, 3) Создание задающей программы.

И. А.Г. Фельдман. Гипотеза равновесной точки.

Мышца вместе с обслуживающими её рецепторами и нейронами ведёт себя как нелинейная пружина: зависимость силы, развиваемой такой мышцей, от ее длины называется мышечной характеристикой (МХ). Мышечные характеристики всех сгибателей и разгибателей сустава создают его суставную характеристику (СХ), т.е. зависимость момента силы, развиваемого мышцами, от угла в суставе (рис. 20). При сохранении позы поддерживается некий суставной угол, а именно такой, при котором СХ пересекается с характеристикой нагрузки, т.е. зависимостью момента силы, создаваемого внешней нагрузкой, от суставного угла. Эта точка пересечения

называется равновесной точкой системы (РТ).

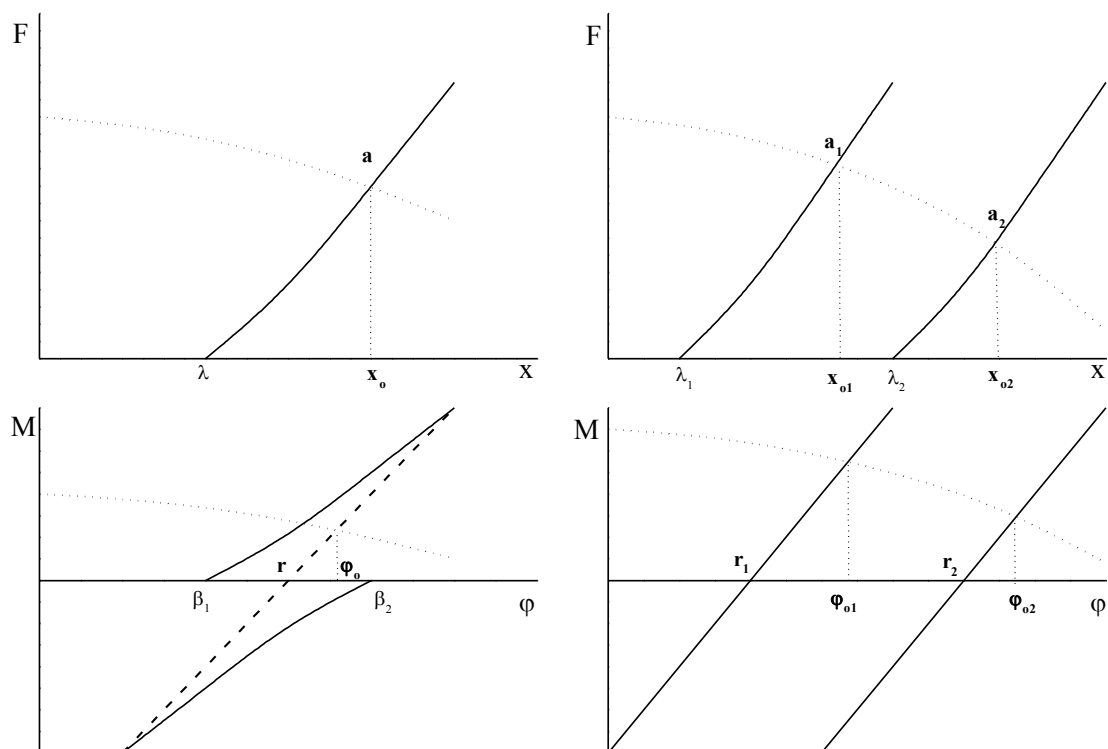


Рисунок 20. Гипотеза равновесной точки.  $X$  – длина мышцы,  $\phi$  – суставный угол,  $F$  – сила,  $M$  – момент силы. А, Б: точка пересечения  $a$  инвариантной характеристики (ИХ) мышцы (сплошная линия) и статической характеристики нагрузки (штриховая) есть РТ системы;  $x_0$  – её равновесное положение,  $\lambda$  – пороговая длина мышцы, управляемый параметр. Смещение  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$  ведёт к сдвигу РТ ( $a_1 \rightarrow a_2$ ) и равновесного положения ( $x_{01} \rightarrow x_{02}$ ). В, Г: Флексорная и экстензорная ИХ (сплошные линии) образуют ИХ сустава (пунктирная прямая). Её точка пересечения с характеристикой нагрузки (штриховая) есть РТ системы. Положение ИХ сустава определяется параметром, зависящим от управляемых параметров  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – угловых значений порогов для флексора и экстензора. Изменение параметра ( $r_1 \rightarrow r_2$ ) ведёт к смещению РТ и вызывает движение в суставе.

Основная идея, объясняющая управление движениями сустава, такова. Для вызова движения управляющая система, т.е. высшие отделы нервной системы, посылают в спинной мозг центральную команду, которая сдвигает суставную характеристику в новое положение. В результате такого смещения РТ системы сустав-груз смещается, в результате начинается движение

сустава, которое в конце концов приводит систему к новому положению равновесия. Особенности описанной системы управления состоят в том, что она а) не требует расчёта сил, вызывающих данное движение; б) обеспечивает эквифинальность положения – конечное положение системы нечувствительно к возмущениям, вносимым по ходу движения.

Гипотеза подтверждена экспериментально.

**II. Автономные подсистемы, работающие на общую цель.** В основании работы лежат экспериментальные исследования потирательного рефлекса у спинальной лягушки. Поскольку лягушка даже без головного мозга оказалась способна осуществлять столь сложное поведение и даже при дополнительных сложностях (изгибание тела, помехи, закрепление одного из суставов из имеющихся у неё пяти), то **вычисление необходимых сил показалось невозможным**. Идея: СУ нужно задавать только РТ (рис. 21). Сила вычисляется автоматически как  $F_i = k_i \cdot (\varphi_i - r_i) + A_i \cdot \varphi'_i$  (последний компонент – естественное демпфирование). Необходимо вычислять для каждого угла только равновесные значения. Например простейшее  $\varphi'_i = k_i \cdot \text{sign} \gamma_i$  или сложнее  $\varphi''_i = k_i \cdot \text{sign} \gamma_i$  и т.д.

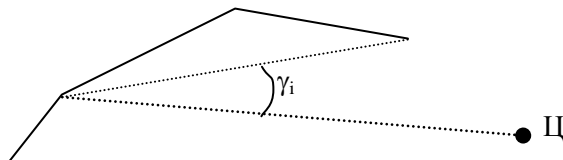


Рисунок 21. Целеполагание для одной степени подвижности конечности.

Отметим особенности подхода.

1) В этой модели каждый сустав работает независимо от других, а о действиях других суставов «узнаёт» только по поведению рабочей точки и своей оси вращения, т.е. по результатам коллективного действия. В этом отношении предложенная модель сходна с поведением коллектива автоматов, исследованным в работах М.Л. Цетлина. Каждый автомат действует самостоятельно, меняя своё поведение в зависимости от

результата, достигнутого всем коллективом. На рассматриваемом уровне управления не требуется высшего центра, который определяет поведение каждого автомата. В нашем случае каждый автомат (система управления суставом) учитывает как результат действия всего коллектива (положение рабочей точки), так и результат работы определённой части коллектива – более проксимально расположенных суставов (положение оси вращения сустава).

2) Непосредственно не программируется ни кинематика или траектория движения, ни силы, необходимые для его осуществления. Система управления программирует лишь смещение равновесных точек для каждого сустава, а движение возникает как следствие этого смещения.

Начиная с классической работы Бернштейна (1947), задача управления многосуставными движениями формулируется как задача преодоления избыточных степеней свободы. Сам Бернштейн видел в качестве основного пути использование сигналов обратной связи. Модель развивает эту идею, но здесь это обратная связь особого типа. Это не сигнал об отклонении от программного движения (что позволило бы внести коррекции), а сигнал о результатах коллективной работы всей системы. Именно этот сигнал связывает все суставы и координирует их работу (полезный результат по Анохину). Кроме того, в этом сигнале существенна роль «внутрицентрального компонента» – информации о текущей равновесной конфигурации конечности, которая поступает не с периферии, а вычисляется в самой системе управления.

В рассмотренной модели управления большое число степеней свободы не вызывает принципиальных затруднений: ведь каждый сустав управляется независимо от других. Более того, увеличение числа суставов не увеличивает времени расчёта положения финальных равновесных точек: все вычисления ведутся параллельно, точно так же одновременно суммируются все сигналы от разных суставов, необходимые для определения положения осей вращения

суставов и положения рабочей точки, поэтому увеличение числа суставов требует только больших «вычислительных средств» (нейронов спинного мозга), но не увеличивает времени управления.

«Лишние» степени свободы позволяют достигать цели при тех или иных внешних ограничениях (например, при фиксации одного из углов). Кроме того, они позволяют решать несколько задач одновременно (например, достигать целевой точки и выбирать необходимую финальную позу и т.п.).

Н.А. Бернштейн развил систему взглядов об иерархической многоуровневой СУ движениями. Модель предполагает по крайней мере 3 уровня управления многосуставными движениями. Первый уровень («образный») задаёт положение цели и запускает движение. После этого он может не вмешиваться в работу в задаче о достижении целевой точки. Второй уровень межсуставного взаимодействия автоматически распределяет задания для отдельных суставов, в основном о нем и модель. Третий уровень осуществляет движение в суставе, определяя усилия мышц в соответствии с РТ – гипотезой («многомерная пружина», РТ – цель).

Верхний уровень может задавать фиксированное положение цели, может (в других задачах) менять положение цели во времени. Алгоритм по сути не меняется.

Некоторые предположения о возможном способе обучения целенаправленным движениям. Возможно – выбор стандартной начальной позы и подбор констант в алгоритме вычисления РТ. Занимается какой-то верхний уровень (как это делает – отдельная интересная задача), после обучения работает только программа (вариабельная по цели). Движение становится «автоматическим». Следовательно, можно предположить, что автоматизированное движение не должно быть точно повторяемым, машинообразным, а, напротив, может выполняться с вариабельностью отдельных суставных углов.

Слишком простой вариант модели. Факты:

1) Финитность (примерное постоянство времени движения при разных расстояниях перемещения конечности).

2) Инвариантная форма нормированного профиля скорости при разных А) скоростях, В) нагрузках, С) движениях (точках начала и конца), Д) субъектах (рис. 22).

3) Отклонения и задержки (рис. 23).

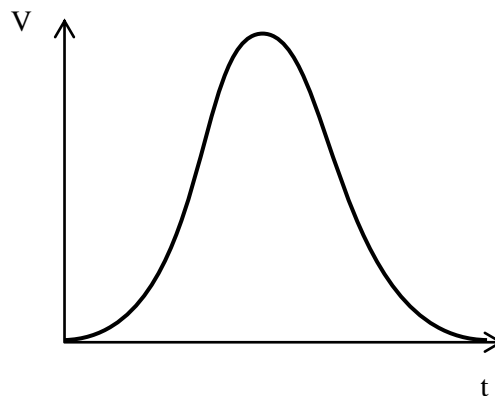


Рисунок 22. Типичная форма профиля скорости перемещения дистальной точки конечности по траектории при достижении цели.

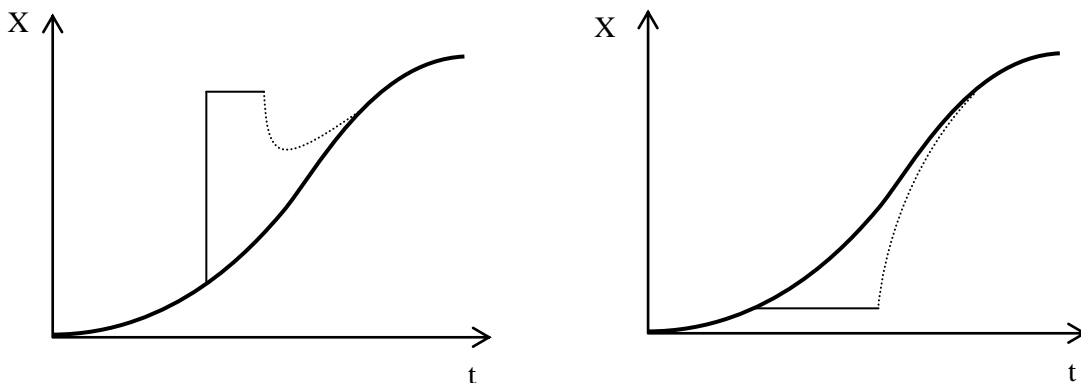


Рисунок 23. Перемещение дистальной точки конечности к цели при помехах и отклонениях..

Найден критерий для плоских движений: 
$$C = \frac{1}{2} \cdot \int_0^T \left[ \left( \frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left( \frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 \right] \cdot dt,$$

его минимизация даёт  $\frac{d^6x}{dt^6} = 0, \frac{d^6y}{dt^6} = 0$ . Тогда  $x(t) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot t^i, y(t) = \sum_{i=0}^5 b_i \cdot t^i$ . Для

движения неограниченного перехода из точки в точку (зная начальные и



конечные условия):

$$x(t) = x_0 + (x_0 - x_f) \cdot (15 \cdot \tau^4 - 6 \cdot \tau^5 - 10 \cdot \tau^3),$$

$$y(t) = y_0 + (y_0 - y_f) \cdot (15 \cdot \tau^4 - 6 \cdot \tau^5 - 10 \cdot \tau^3),$$

где  $\tau = t/T$ ,  $T$  – полное время движения.

Отличное совпадение ( $\approx 4\%$  отклонения) для реального и вычисленного по критерию движений для случаев: 1) без ограничений, 2) обход препятствий на пути, 3) кривая ( $\approx$  по трафарету), 4) проход через заданную промежуточную точку. Совпадение как для кинематических параметров, так и для моментов.

### III. Создание задающей программы.

Задача – построение движения (на примере ходьбы). Вообще говоря, при исследовании необходимы следующие этапы: 1) выделить избыточные степени свободы (ИСС), существенные для данной задачи построения движения; 2) создать экспериментальные условия варьирования по выделенным ИСС в достаточно широком диапазоне существующих параметров; 3) на множестве варьируемых реализаций выявить функциональные связи или синергии, которые обеспечивают редукцию ИСС; 4) понять принцип или механизм формирования синергий.

По Н.А. Бернштейну построение движения есть преодоление ИСС, причем ИСС разного типа. 1) Связанные с многозвенностью, 2) с существованием разных мышц, ДЕ и т.п. (рассматривали преодоление этих ИСС раньше). Здесь выделены чисто кинематические ИСС для целевой траектории конечности в шагательных движениях, которые ранее не учитывались. Именно задача преодоления кинематических ИСС рассмотрена как универсальная задача кинематического построения шагательных движений.

При шагательных движениях всегда наблюдается динамическая вариативность и относительно устойчивая кинематическая картина. Кинематический образ (для некоторых движений по крайней мере) – целевая

функция для конкурентно настроенных динамических исполнителей. Эволюционное сходство кинематических программ шагания – от членистоногих до человека. Акция построения локомоторного движения базируется на элементарной универсальной кинематической синергии. Возможность разных конструктивных реализаций синергий как стандартных подпрограмм ЦНС. Могут формироваться образы целевых траекторий привычных движений («оцифрованные копии») и запоминаться в библиотеку (+ преобразователи для модифицированных условий). В другом варианте синергии – алгоритмы решений задач построения движений определенного класса на основе текущей информации. Эти алгоритмы и пишутся в «библиотеку» (а в генетических программах, вероятно, алгоритм построения в эмбриогенезе нужного алгоритма).

Шагательные движения эволюционно древние, их алгоритмы – синергии (конечно, транслированные и модифицированные) дошли и до человека и обеспечили определённую общность кинематических законов. Ребенок учится пользоваться существующими уже синергиями – алгоритмами построения движений – как учатся пользоваться инструментами. Одна из основных идей Бернштейн – произвольные движения не являются реакциями, т.е. пассивными ответами ЦНС на внешние стимулы, а являются акциями, т.е. активными решениями задач построения.

### **13. Что же такое управление?**

Вначале – несколько слов о ключевом понятии «инвариант». Началось с геометрии. Стремление к концептуально-методологической целостности. Язык инвариантов как базовый язык системной организации. В основании всех естественных наук лежит некая измерительная практика. А. Пуанкаре: «геометрия есть некоторое условное соглашение, своего рода компромисс между нашей любовью к простоте и нашим желанием не слишком удаляться

от того, что сообщают нам наши инструменты». Ф. Клейн – геометрия – это теория геометрических инвариантов. Унифицируя Пуанкаре: разные области знания отличаются выбором инструментов и разными формами «простоты». Унифицируя Клейна: физика – теория физических инвариантов, биология – теория биологических инвариантов и т.п. Расширенная трактовка инвариантности позволяет и ответ Пуанкаре считать модификацией ответа Клейна, т.к. инструменты и измерительные процедуры определяют собственные инварианты, а понятия простоты тоже выражаются в инвариантной форме.

Понятие инварианта подразумевает существование некоторого разнообразия, относительно которого и определяются свойства неизменности, т.е. инвариантности. Использование языка инвариантов предполагает изучение разнообразий свойств и состояний в разных вариантах ограничений как инвариантов. Т.е. инварианты имеют смысл редукций избыточной изменчивости, которая обеспечивается степенями свободы системной организации. Изучение разнообразий системной организации с целью выявления свобод и инвариантов – обобщённое содержание научного поиска в разнообразиях неживой и живой природы.

Вернёмся к управлению в биологии. А.А. Ляпунов: управление – характеристическое свойство живого. Попытка перенести язык инвариантов на биомеханическую и даже более широкую биологическую почву. Установили соответствие синергия ↔ инвариант. Позволяет перейти к количественным методам изучения результатов деятельности управления, выявляя устойчивые связи на разнообразиях виртуальной изменчивости. Центральный вопрос кибернетики: что такое управление? История. От рефлекторной парадигмы к парадигме синергий. Предкибернетический период – рефлекторная теория Павлова. Недостаточность и неадекватность рефлекторной схемы. Понятие «синергия». Термин исходно введен Шеррингтоном в конце прошлого века для обозначения кооперации мышц в

реализациях целостных двигательных актов. Обобщенная физиологическая трактовка синергии как комплексного акта управления, включающего кооперацию разных уровней, была предложена позднее. Новое – выделение не столько формы организации синергии – кооперативности уровней, сколько содержания – организации стандартных связей, которые обеспечивают функциональный фон решения тактических целевых задач или «словарь движений». И синергии, и инварианты ограничивают число независимых переменных, характеристик, параметров, т.е. оба конструкта определяют в разных семантических формах редукцию избыточных свобод изменчивости систем, вообще говоря, в смысле структуры и функций. В физиологии концепция синергий становится популярной. Смена парадигм: от рефлексов к синергиям. Переход на следующий уровень проблем управления.

Принцип активности: жизнь – не реакция, а акция. Бернштейн разделил эти понятия, но полной ясности нет. Пока мировоззрения и методологии «растут» в основном на физико-химических понятиях: живое – сложная химическая машина. Полезный, но ограниченный подход, машина вообще – некоторый заранее организованный преобразователь. Деятельность живых организмов во многих отношениях организуется машиноподобным образом, но это только подготавливает и обеспечивает реализации истинных акций. Синергия – это в общем случае не столько «словарь», сколько операционная система нейронной вычислительной машины, т.к. она имеет широкий сервисный смысл, включая словари, меню, часы, программы трансляции, стыковки с периферией и т.д. Понятие «построения» – необходимое и ключевое, это характеристическое свойство АКЦИ в широком смысле. Различение РЕАКЦИЙ и АКЦИЙ в отношении задач построения. Интеллект – не столько поиск и перебор подходящих комбинаций, сколько построение подходящего способа достижения цели с учётом ситуации. Когда найдено решение – снимается главная проблема – проблема неизвестных альтернатив.

Можно решение алгоритмизировать, запомнить, а последующие решения реализовать по принципу копирования эталона. Общая задача построения суть АКЦИЯ преодоления ИСС, присущих условиям, методу решения и т.д.

РЕАКЦИИ – это действия, которые не требуют дополнительных степеней свободы для реализации, а АКЦИИ – действия, которые требуют свобод (в смысле – возможны только при наличии свобод).

Ключевое слово кибернетики и биологии. Действия или акции человека обладают многими степенями свободы в рамках одной целевой задачи, и тем более в принятиях многоцелевых решений. Огромную эвристическую ценность адекватного выбора ключевого понятия в науке неоднократно подчёркивал Пуанкаре. Можно ли организовать управление некоторым объектом, если он не обладает необходимыми для реализации целевой задачи свободами? Всякой организации управления должна предшествовать организация необходимых и достаточных свобод, в противном случае управление не может быть эффективным.

Управление как системная категория. Кибернетика исходно формировалась на интуитивной основе, долгое время бессодержательное понятие информации служило как бы синонимом кибернетики. Управление определялось через перечисление. Конструктивное абстрактное определение: УПРАВЛЕНИЕ – целевая акция редукции избыточных свобод системной (структурной и/или функциональной) организации. Смысл редукции в формировании между независимыми характеристиками связей, в изменчивости которых материализуются свободы. Роль организаторов связей, или редукторов свобод, могут выполнять программы, синергии или же регуляторы, фиксаторы и т.д. Для раскрытия существа управления в общем случае необходимо объективировать степени свободы изучаемой системы и исследовать разнообразия виртуальной изменчивости, тогда ограничения разнообразия – инварианты – будут служить индикатором связей, т.е. акций управления.

Конкретные системы могут воплощаться на разных материальных носителях. Материальное разнообразие воплощений – одно из свидетельств нематериальной сущности управления. Для управления с существенны значения в символьной значимости, именно как нематериальные семантические сущности. Основной вопрос философии о первичности материи решён, но из этого вовсе не следует материальность сознания! Более того, сознание направляется движением идей. Как раз управление и его атрибуты – алгоритмы и информация – яркие примеры не материальных, а символьных, идеальных сущностей.

Обсудим вкратце также вопрос – что такое организация?

Традиционная трактовка: (случайное, необходимое) – организация. Концепция неконструктивна. Постулат несвободы, только «случай» – основа изменчивости. А фенотипическая изменчивость сводится к адаптационному приспособленчеству. Конечно, рутинные процессы, закрепощающие и геном и интеллект, составляют огромную часть жизнедеятельности, но всё же они носят вспомогательный, сервисный характер (что выше отмечаюсь на примере синергий), создавая фон для конструирования и проявления «свободы воли». Мироззрение стохастического детерминизма исторически закономерно, оно отражает описательные методы прежней гносеологии, т.е. адекватно парадигме Наблюдателя: когда изменчивость рассматривается как первичная данность, существенной является только мера её определенности или неопределенности (случайности или необходимости). Физическое мировоззрение рассматривает мир как формы существования и движения материи. Теперь важнее не проблемы форм существования, а проблемы правил построения. Для понимания сущности биоорганизации становится необходимым переход с описательной точки зрения на конструктивную, с позиции Наблюдателя на позицию Конструктора. Сам характер изменчивости остаётся существенным, но служит лишь характеристикой способа реализации избыточности. Первичным становится понятие не

изменчивости, а избыточности свобод, которая и обуславливает возможность изменчивости. То есть: (избыточность, инварианты) – организация. Новая проблема: необходимо создавать те свободы, те избыточные возможности, которые затем преодолеваются в акциях управления или самоорганизации. Двигательные системы организмов – один из наглядных примеров предварительного, целевого и системного формирования большого числа избыточных свобод, в частности двигательных органов, которые затем используются развитым организмом как для выработки двигательных стереотипов – синергий, так и для освоения новых классов движений, где существенную роль играют функциональные свободы. Наиболее загадочный фактор эволюции – программы формирования избыточности, ибо они создают первичную основу актов творения, осуществляемых программами редукции избыточности.

#### 14. О локомоции

Кинематический язык – задание некоторого множества параметров, описывающих траектории конечности. 1 конечность на плоскости – 3 независимых параметра для одной точки (3 степени свободы построения, траектория – 2 и темп движения по ней). Частные режимы ходьбы параметризуются по скорости ходьбы  $v$ . Задание режима – 2 функциональные связи между 3 независимыми параметрами – имеет физиологический смысл синергии и можно назвать кинематическими инвариантами ходьбы. Описание межконечностной координации  $\equiv$  условия фазировок (соотношение фаз).

Исследовалась стационарная ходьба, т.е. траектории точек (1 дистальная точка) периодические. Длина шага  $l$ , период  $T$ , скорость  $v = l/T$  (рис. 24).

Вообще параметров больше применяется – около 10. Многие достаточно формальны.  $T = T_+ + T_-$ ;  $l = v T$ ;  $l_{\pm} = v T_{\pm}$ ;  $\gamma = T_+/T_- = v/u$ ;  $u = l$ .

$/T_+$ . Независимых только 3. Выбор неоднозначен. 3-мерное параметрическое пространство ходьбы. Каждая конкретная (стационарная!) реализация – 1 точка. Все возможные реализации – некоторое подпространство. Естественное управление – по 1 параметру. ( $\mathbf{v}$ ) Все остальные параметры – функции от  $\mathbf{v}$ . Подпространство нормального режима ходьбы одномерное. С физиологической точки зрения – две из трёх синергий, редуцирующих ИСС, имеют постоянное программное обеспечение. Текущее управление – только третьей связью. Каждая синергия – связь, поверхность в пространстве. Их пересечение – линия, одномерное пространство. Поверхности ищутся экспериментально – разные аномальные режимы. Изоритмический режим ходьбы  $\mathbf{T} = \mathbf{const}$ , изометрический режим  $\mathbf{l} = \mathbf{const}$ . Линии для разных  $\mathbf{T}$  и разных  $\mathbf{l}$  (параметризованы по  $\mathbf{v}$ ). 1) Поверхности  $\mathbf{z}_T$  и  $\mathbf{z}_l$  совпадают –  $\mathbf{z}_w$ . 2) Линия нормального режима принадлежит той же поверхности и задаётся как  $\mathbf{T}_+ \cdot \mathbf{l} = \mathbf{const}$ .

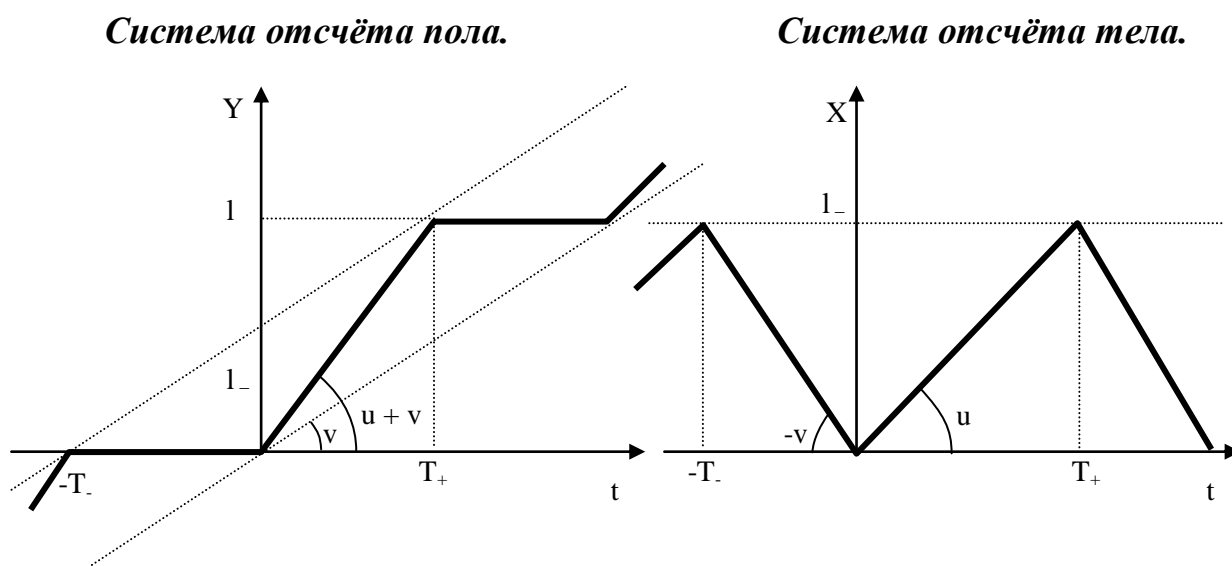


Рисунок 24. Траектория дистальной точки конечности в двух системах отсчета.

Подпространство (поверхность)  $\mathbf{z}_w$  задаёт ОБЩИЙ ИНВАРИАНТ ШАГА:  $\mathbf{GI}: \mathbf{u} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{v}$ . Каждое из условий, характеризующих режим



ходьбы – есть ЧАСТНЫЙ ИНВАРИАНТ ШАГА **CI**. Т.е. кинематика шага задаётся двумя инвариантами, один из которых одинаков во всех режимах – общий, вид второго зависит от выбора режима. 2 программы в ЦНС. Построение второй может быть под влиянием афферентации.

$$\mathbf{T}_+ \cdot \mathbf{l} = \mathbf{const} \text{ (HPX)}; \mathbf{l} = \mathbf{const} \text{ (ИМПX)}; \mathbf{T} = \mathbf{const} \text{ (ИРРХ)}.$$

Расшифровка программ кинематического управления шагом – выяснение физиологического смысла двух типов инвариантов. Было – только по ходьбе человека, унификация для всех животных (многоножки – лошади):

$$\mathbf{GI}: \mathbf{u} = (\mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{v}) / (1 - \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{v}); \mathbf{CI}: \mathbf{T}_+ \cdot \mathbf{l} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{T} + \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{l}.$$

Межконечностная координация. **z**-траектории всех ног одинаковы. Сдвиг фаз смежных пар ног одинаков (рис. 25).

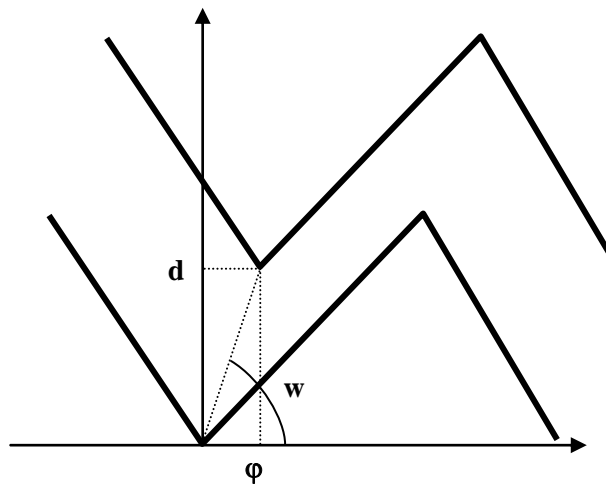


Рисунок 25. Траектории дистальных точек двух конечностей при двуногой ходьбе в системе отсчета тела.

$\mathbf{w} = \mathbf{d}/\phi$  – скорость метахрональной волны.  $\mathbf{d} \approx \mathbf{const}$  (эксперимент).  
Условие непересекаемости траекторий:  $-\mathbf{v} \leq \mathbf{w} \leq \mathbf{u}$ . Много интересных подробностей (при  $\mathbf{w} = -\mathbf{v}$  или  $\mathbf{u}$  след в след и т.п.)

$$\mathbf{GI}: \frac{\mathbf{v} + \mathbf{w}}{\mathbf{v} + \mathbf{c}_0} \cdot \frac{\mathbf{u} - \mathbf{c}_0}{\mathbf{u} - \mathbf{w}} = \omega; \mathbf{0} \leq \omega = \mathbf{const} \leq \infty.$$

Целевая интерпретация **CI**. (Как практически решается задача построения шага). Эталонное событие для всех режимов ходьбы – событие наступания  $\mathbf{Y}_+ = (\mathbf{T}_+, \mathbf{l})$ . Это есть целевой эталон. Можно задать  $\mathbf{f}(\mathbf{T}_+, \mathbf{l}) =$

**const**  $\rightarrow$   $E_y$ , целевой эталон, инвариант семейства  $Y$ -траекторий, соответствующих разным  $v$ . Можно также найти целевой эталон в системе отсчёта тела в общем виде:

$$(\mathbf{x}_+ - \mathbf{x}_c)' \cdot \mathbf{M} \cdot (\mathbf{x}_+ - \mathbf{x}_c) = \mu, / \mathbf{x}_+ \rightarrow \text{вектор}/,$$

где  $\mathbf{x}_+$  – событие наступания ( $T_+$ ,  $L$ );  $\mu$ ,  $\mathbf{x}_c$  – **const**, определяющие функциональную специфичность режима ходьбы,  $\mathbf{M}$  – метрическая матрица (вообще говоря, нелинейная), задающая преобразование систем координат  $Y \rightarrow X$  и определяемая видом **GI**. Разные (в смысле **CI**) режимы ходьбы строятся с помощью одинаковых гиперболических ветвей как метрических (целевых) эталонов, а различия в режимах проявляются в разных смещениях их центров. Такой способ организации мобильной метрики – принцип гомометричности.

Локомоторные синергии, как высокоавтоматизированные комплексы программ и авторегуляций, несомненно должны содержать некоторую базовую программу, которая обеспечивает циклическую автоматию и тем самым играет роль локомоторного генератора (ЛГ). Методология локомоторных инвариантов позволяет поставить задачу теоретического конструирования модели ЛГ на аналитическую основу, но дальнейший путь реализации инвариантных отношений в конкретной модели существенно зависит от исходно принятой концепции принципов управления. ЛГ отдельно или совместно решает следующие задачи: 1) временная организация – длительности фаз и период; 2) относительная фазировка двигательных элементов – пространственно-временная координация в собственном моторном пространстве системы; 3) целевая привязка – пространственно-временное согласование с внешним пространством цели. Пейсмекерные клетки – электрохимические генераторы ритма, инициируют распространяющуюся волну возбуждения. В последнее время популярна модель кольцевого генератора ритмических процессов, в которой движение волны возбуждения по замкнутой среде из нейронных элементов

обеспечивает последовательную инициацию команд переключения фаз цикла, например, дыхания или шага. В принципе любую двигательную синергию можно охарактеризовать на основе внутрицентральной «метакрональной волны», которая, распространяясь в распределенной среде мозга, играет роль последовательного инициатора очередных событий.

В кольцевой модели обе переменные  $t$  и  $x$  совмещаются в одном цикле. Нет необходимости иметь пейсмекерный элемент, но необходим иницирующий элемент, работающий в ждущем режиме и связанный с двумя участками проводящей среды: пока волна за время  $T_.$  распространяется по участку (-) осуществляется фаза опоры, затем иницируется участок (+) фазы переноса, его волна проходит за время  $T_+$ . Регуляция длительности цикла  $T = T_ + T_+$  осуществляется скоростью движения волны – в общем случае скорости можно считать разными –  $v_.$  и  $v_+$  =  $u$ . Полная модель ЛГ для всех конечностей строится далее в виде полициклического комплекса, в котором иницирующие элементы последовательных циклов связаны посредством дополнительной среды, обеспечивающей фазировку индивидуальных циклов с помощью метакрональных волн. Однако, выделять специальную среду для метакрональных волн не всегда целесообразно. Феноменологически полезные модели полициклических ЛГ: походка «след в след в фазе опоры» реализуется на основе совмещения опорных участков смежных индивидуальных циклов; аналогично «след в след в фазе переноса».

Бегущее по участкам кольцевого ЛГ возбуждение имеет функциональный смысл волны управления (ВУ) – она моделирует кинематическую картину целевого управления и тем самым предопределяет последовательную фазировку включения необходимых моторных элементов и динамических подсистем, обеспечивающих подстройку силового поля двигательного органа под заданную кинематику. Каждая модель ЛГ представляет собой структурно оформленный вариант локомоторной

кинематики или пространственно-временной геометрии управляющей системы, которая математически характеризуется набором соответствующих инвариантов. Переход от структурных схем ЛГ к эквивалентным пространственно-временным диаграммам означает временную развёртку акта движения ВУ по упорядоченному множеству активных элементов.

## **15. ЛИТЕРАТУРА**

### **15.1. Основная литература**

1. Гуськова, М.В. Моделирование в образовательной эвалюации. // М.В. Гуськова / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», №6, 2012.  
<http://znaniium.com/bookread.php?book=488063>
2. Попов, Г.И. Биомеханика. // Г.И. Попов / М: Академия, 2008.- 253 с.
3. Самойлов, В.О. Медицинская биофизика. // В.О. Самойлов / Санкт-Петербург: СпецЛит, 2007.- 560 с.
4. Антонов, А.В. Системный анализ. // А.В. Антонов / М: Высш. школа, 2006.- 451 с.

### **15.2. Дополнительная литература**

1. Анохин, П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. // П.К. Анохин / Принципы системной организации функций.- М.: Наука, 1973.- С. 5-61.
2. Аршавский, Ю.И. Мозжечок и управление ритмическими движениями. // Ю.И. Аршавский, И.М. Гельфанд, Г.Н. Орловский / М.: Наука, 1984.- 165 с.
3. Беркинблит, М.Б. Модель управления движениями многосуставной конечности. // М.Б. Беркинблит, И.М. Гельфанд, А.Г. Фельдман / Биофизика.- 1986.- Т. 31, вып. 1.- С. 128-137.
4. Бернштейн, Н.А. О построении движений.- // Н.А. Бернштейн / М.:

Медгиз, 1947.- 255 с.

5. Биотехнические системы: Теория и проектирование. // Под ред. В.Я. Ахутина / Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1981.

6. Коренев, Г.В. Введение в механику человека. // Г.В. Коренев / М.: Наука, 1977.- 264 с.

7. Рокотова, Н.А. Моторные задачи и исполнительная деятельность: Исследование координированных движений руки. // Н.А. Рокотова, Е.К. Бережная, И.Д. Богина, И.М. Горбунова, Е.С. Роговенко / Л.: Наука, 1971.- 180 с.

8. Смолянинов, В.В. От инвариантов геометрии к инвариантам управления. // В.В. Смолянинов / Интеллектуальные процессы и их моделирование.- М.: Наука, 1987.- С. 66-110.

9. Смолянинов, В.В. Локомоторная теория относительности. // В.В. Смолянинов / М., 1984.- 75 с.

*Учебное издание*

**Скоринкин Андрей Иванович**

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

Дизайн обложки  
*М.А. Ахметов*

Подписано в печать 14.05.2015.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. .  
Тираж      экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37  
тел. (843) 233-73-59, 233-73-28