

Е.И. Юревич

# **ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ**

# Содержание

Предисловие

Введение

Глава 1. История развития робототехники

1.1. Предыстория робототехники

1.2. Возникновение и развитие современной робототехники

1.3. Развитие отечественной робототехники

Глава 2. Управление движением человека

2.1. Постановка задачи

2.2. Общая схема системы управления движением человека

2.3. Динамические уровни управления движением

2.4. Tактический уровень управления движением

2.5. Стратегический уровень управления движением

Глава 3. Устройство роботов

3.1. Состав, параметры и классификация роботов

3.2. Манипуляционные системы

3.3. Рабочие органы манипуляторов

3.4. Системы передвижения мобильных роботов

3.5. Сенсорные системы

3.6. Устройства управления роботов

3.7. Особенности устройства других средств робототехники

Глава 4. Приводы роботов

4.1. Классификация приводов

4.2. Пневматические приводы

4.3. Гидравлические приводы

4.4. Электрические приводы

4.5. Комбинированные приводы

4.6. Рекуперация энергии в приводах

4.7. Искусственные мышцы

Глава 5. Системы управления роботами

5.1. Классификация систем управления

5.2. Системы программного управления

5.2.1. Системы дискретного циклового управления

5.2.2. Системы дискретного позиционного управления

5.2.3. Системы непрерывного управления

5.2.4. Системы управления по силе

5.3. Системы адаптивного управления

5.4. Система интеллектуального управления

5.5. Особенности управления средствами передвижения роботов

5.6. Системы группового управления роботами

## Глава 6. Динамика роботов

- 6.1. Основные принципы организации движения роботов
- 6.2. Математические модели роботов
- 6.3. Особенности динамики и способы динамической коррекции систем управления роботов
- 6.4. Компьютерное моделирование робототехнических систем

## Глава 7. Проектирование средств робототехники

- 7.1. Постановка задачи проектирования средств робототехники
- 7.2. Особенности проектирования роботов
- 7.3. Методы проектирования средств робототехники

## Глава 8. Применение средств робототехники в промышленности

- 8.1. Классификация технологических комплексов с применением роботов
- 8.2. Компоновки технологических комплексов с роботами
- 8.3. Управление технологическими комплексами
- 8.4. Этапы проектирования технологических комплексов
- 8.5. Особенности роботизации технологических комплексов в действующих производствах
- 8.6. Гибкие производственные системы

## Глава 9. Применение промышленных роботов на основных технологических операциях

- 9.1. Классификация технологических комплексов с роботами на основных технологических операциях
- 9.2. Сборочные робототехнические комплексы
- 9.3. Сварочные робототехнические комплексы
- 9.4. Робототехнические комплексы для нанесения покрытий

## ГЛАВА 10. Применение промышленных роботов на вспомогательных операциях

- 10.1. Классификация роботизированных технологических комплексов
- 10.2. Роботизированные технологические комплексы механообработки
- 10.3. Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки
- 10.4. Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве
- 10.5. Роботизированные технологические комплексы литья под давлением

## ГЛАВА 11. Особенности применения средств робототехники в немашиностроительных и в непромышленных отраслях

- 11.1. Робототехника в немашиностроительных отраслях промышленности
- 11.2. Робототехника в непромышленных отраслях

## Глава 12. Экстремальная робототехника

12.1. Экстремальная робототехника в промышленности

12.2. Космическая робототехника

12.3. Подводные роботы

12.4. Военная робототехника

Глава 13. Социально-экономические аспекты робототехники

13.1. Социально-экономическая эффективность применения средств робототехники

13.2. Техника безопасности в робототехнике

Глава 14. Робототехника завтра

Приложение

Список литературы

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым переработанным изданием учебника «Основы робототехники». Ленинград. Машиностроение. Ленинградское отделение. 1985 год.

Как и ее первое издание книга написана по материалам лекций, которые автор все эти годы читает в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Книга предназначена для студентов технических вузов как учебное пособие по общему курсу робототехники. Для студентов, специализирующихся в этой области, книга должна служить основным литературным источником для первой специальной дисциплины, за которой последует цикл спец.курсов, соответствующих основным ее главам.

## ВВЕДЕНИЕ

Предмет робототехники — это создание и применение роботов и других средств робототехники различного назначения. Возникнув на основе кибернетики и механики, робототехника в свою очередь породила новые направления развития и самих этих наук. Для кибернетики это связано прежде всего с интеллектуальным управлением, которое требуется для роботов, а для механики с — многозвенными механизмами типа манипуляторов.

Робот можно определить как универсальный автомат для осуществления механических действий, подобных тем, которые производит человек, выполняющий физическую работу. При создании первых роботов и вплоть до сегодняшнего дня образцом для них служат физические возможности человека. Именно стремление заменить человека на тяжелых работах и породило сначала идею робота, затем первые попытки ее реализации (в средние века) и, наконец, обусловило возникновение и развитие современной робототехники и роботостроения.

На рис.В.1 показана функциональная схема робота. Она включает исполнительные системы — манипуляционную (один или несколько манипуляторов) и передвижения, если робот подвижный, сенсорную систему, снабжающую робота информацией о внешней среде, и устройство управления. Исполнительные системы в свою очередь состоят из механической системы и системы приводов. Механическая система манипулятора — это обычно кинематическая цепь, состоящая из подвижных звеньев с угловым или поступательным перемещением, которая заканчивается рабочим органом в виде захватного устройства или какого-нибудь инструмента.

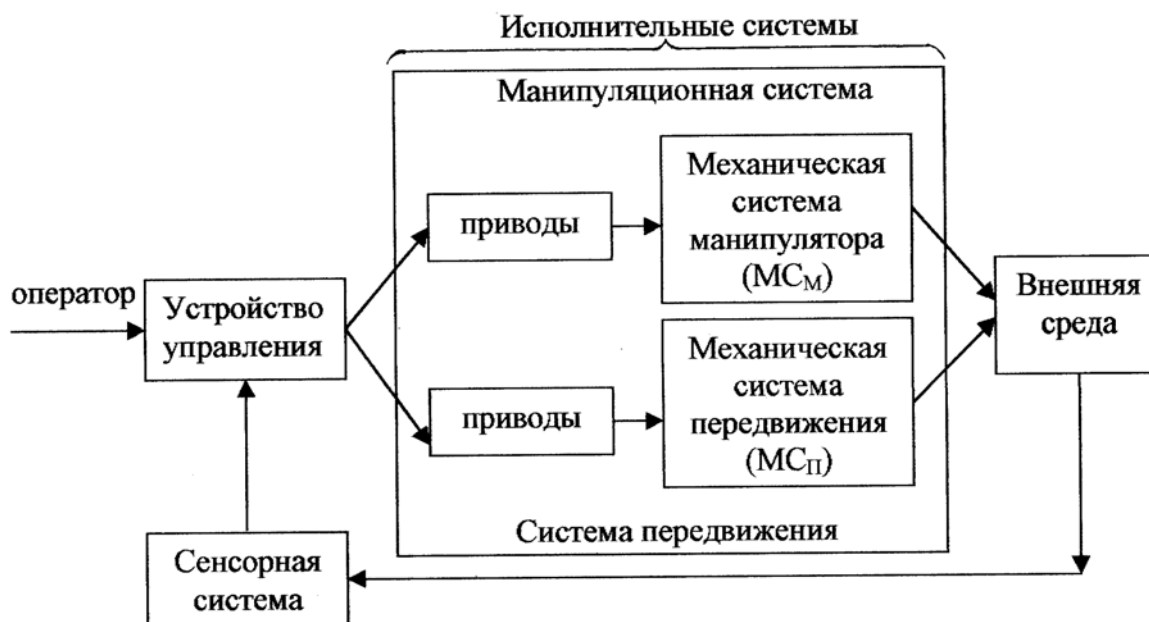


Рис.В.1. Функциональная схема робота

Из данного определения следует, что робот – это машина автоматического действия, которая объединяет свойства машин рабочих и информационных, являясь, таким образом, принципиально новым видом машин. В достаточно развитом виде роботы аналогично человеку осуществляют активное силовое и информационное взаимодействие с окружающей средой и благодаря этому могут обладать искусственным интеллектом и совершенствовать его. Правда, пока еще роботы очень далеки по своим интеллектуальным возможностям от человека.

При решении проблемы создания роботов одним из естественных путей является копирование человека и живой природы вообще. Однако не менее важен и поиск принципиально новых путей, определяемых возможностями современной техники. Пример первого подхода — создание механических рук шарнирного типа и захватных устройств со сгибающимися пальцами. Примеры второго подхода — использование электромагнитного поля для ориентации и взятия предметов и, наконец, колесный ход вместо шагания. Аналогичные примеры можно найти и применительно к сенсорным системам (создание «сверхчувственных» органов наряду с копированием органов чувств животных). От ранее известных видов машин роботы принципиально отличаются своей универсальностью (многофункциональностью) и гибкостью (быстрым переходом на новые операции). Под универсальностью понимается универсальность рабочих органов робота и их движений, хотя сегодня до универсальности руки человека роботам еще далеко. (Правда, это компенсируется возможностью быстрой смены рабочих органов робота в процессе выполнения операций).

Универсальность роботов предполагает возможность выполнения ими целенаправленных действий, которые требуют определенных интеллектуальных способностей. Это открывает широкие возможности использования роботов в качестве как основного технологического оборудования (на сборке, сварке, окраске и т.п.), так и вспомогательного – для замены рабочих, занятых на обслуживании такого оборудования.

Универсальность роботов дает возможность автоматизировать принципиально любые операции, выполняемые человеком, а быстрота перестройки на выполнение новых операций при освоении новой продукции или иных изменениях в производстве позволяет сохранить за автоматизируемым с помощью роботов производством по крайней мере ту же гибкость, которую на сегодня имеют только производства, обслуживаемые человеком. Роботы потому и появились лишь во второй половине XX столетия, что именно сейчас назрела необходимость в таких универсальных и гибких средствах, без которых невозможно осуществить комплексную автоматизацию современного производства с его большой номенклатурой и частой сменяемостью выпускаемой продукции, включая создание гибких автоматизированных производств.

Термин «робот», как известно, славянского происхождения. Его ввел известный писатель К. Чапек в 1920 г. в своей фантастической пьесе «R.U.R.» («Россумовские универсальные роботы»), где так названы механические рабочие, предназначенные для замены людей на тяжелых физических работах. Название «робот» образовано от чешского слова *robot*, что означает тяжелый подневольный труд.

Помимо роботов для тех же целей широкое применение получили манипуляторы с ручным управлением (копирующие манипуляторы, телеоператоры и т.п.) и с различными вариантами полуавтоматического и автоматизированного управления, а

также однопрограммные (не перепрограммируемые) автоматические манипуляторы (автооператоры и механические руки). Все эти устройства являются предшественниками роботов. Появились они главным образом для манипулирования объектами, непосредственный контакт с которыми для человека вреден или опасен (радиоактивные вещества, раскаленные болванки и т. п.). Однако хотя появление роботов существенно сузило сферу их применения, эти простые средства механизации и автоматизации не потеряли своего значения. Все они сегодня вместе с роботами входят в общее понятие средств робототехники.

Как уже было отмечено, объективной причиной возникновения и развития робототехники явилась историческая потребность современного производства в гибкой автоматизации с устранением человека из непосредственного участия в машинном производстве и недостаточность для этой цели традиционных средств автоматизации. Поэтому задачей робототехники наряду с созданием собственно средств робототехники является разработка основанных на них систем и комплексов различного назначения. Системы и комплексы, автоматизированные с помощью роботов, принято называть роботизированными. Роботизированные системы, в которых роботы выполняют основные технологические операции, называются робототехническими.

Наряду с внедрением в действующие производства роботы открывают широкие перспективы для создания принципиально новых технологических процессов, не связанных с весьма обременительными ограничениями, налагаемыми непосредственным участием в них человека. При этом имеется в виду как действительно очень ограниченные физические возможности человека (по грузоподъемности, быстрдействию, точности, повторяемости и т. п.), так и требуемая для него комфортность условий труда (качество атмосферы, отсутствие вредных внешних воздействий и т. п.). Сегодня необходимость непосредственного участия человека в технологическом процессе зачастую является серьезным препятствием для интенсификации производства и создания новых технологий.

Роботы получили наибольшее распространение в промышленности и прежде всего в машиностроении. Предназначенные для этой цели роботы называют промышленными роботами (ПР). Не менее широкие перспективы имеют роботы в горнодобывающей промышленности, металлургии и нефтяной промышленности (обслуживание бурильных установок, монтажные и ремонтные работы), в строительстве (монтажные, отделочные, транспортные работы), в легкой, пищевой, рыбной промышленности.

Наряду с использованием в промышленности роботы применяются и в других областях народного хозяйства и человеческой деятельности: на транспорте (включая создание шагающих транспортных машин), в сельском хозяйстве, здравоохранении (протезирование, хирургия — стерильная, дистанционная, обслуживание больных и инвалидов, транспортировка), в сфере обслуживания, для исследования и освоения океана и космоса и выполнения работ в других экстремальных условиях (стихийные бедствия, аварии, военные действия), в научных исследованиях.

Применение роботов наряду с конкретным технико-экономическим эффектом, связанным с повышением производительности труда, сменности работы оборудования и качества продукции, является важным средством решения социальных проблем, позволяя освобождать людей от тяжелого, опасного и монотонного труда.



# ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

## 1.1. Предыстория робототехники

Корни робототехники уходят в глубокую древность. Уже тогда впервые возникли идеи и были предприняты первые попытки создания человекоподобных технических устройств, подвижных культовых статуй, механических слуг и т. п. Статуи богов с подвижными частями тела (руки, голова) появились еще в Древнем Египте, Вавилоне, Китае.

В «Илиаде» Гомера божественный кузнец Гефест выковывает механических служанок. Аристотель упоминает о приводимых в движение с помощью ниток куклах-марионетках, из которых создавались целые механические театры. До нас дошли книги Герона Александрийского (I век н.э.), где описаны подобные и многие другие автоматы древности. В качестве источника энергии в них использовались вода, пар, гравитация (гири).

В средние века большой популярностью пользовались различного рода автоматы, основанные на использовании часовых механизмов. Были созданы всевозможные часы с движущимися фигурами людей, ангелов и т. п. К этому периоду относятся сведения о создании первых подвижных человекоподобных механических фигур — андроидов. Так, андроид алхимика Альберта Великого (1193—1280) представлял собой куклу в рост человека, которая, когда стучали в дверь, открывала и закрывала ее, кланяясь при этом входящему.

Кстати, в средние века было высказано предположение о возможности создания гомункулуса — живого человечка средствами алхимии. Создание такого гомункулуса химическим путем в колбе описывает Гете в «Фаусте»:

Нам говорят «безумец» и «фантаст»,  
Но, выйдя из зависимости грустной,  
С годами мозг мыслителя искусный  
Мыслителя искусственно создаст.

Работы по созданию андроидов достигли наибольшего развития в 18 в. одновременно с расцветом часового мастерства. Механиками-часовщиками были созданы андроиды-музыканты, рисовальщики, писцы. К ним относится, например, «флейтист» французского механика Жака Вокансона (1709 – 1789) — фигура в рост человека; с помощью подвижных пальцев «флейтист» исполнял заложенные в его программу 11 мелодий.

Целый ряд человекоподобных автоматов был создан швейцарскими часовщиками Пьером-Жаком Дро (1721—1790) и его сыном Анри Дро (1752 – 1791). От имени последнего было образовано позднее и само название «андроид». Эти человекоподобные игрушки представляли собой многопрограммные автоматы с оперативно сменяемыми программами. Программы задавались с помощью сменных кулачков, устанавливаемых на вращающемся барабане, и других подобных механических устройств. Привод осуществлялся от часового механизма (рис. 1.1 и 1.2).



Рис.1.1. Механический писец Анри Дро.



Рис.1.2. Механический негр-флейтист (XIX в., Парижский национальный музей)

Из отечественных устройств подобного типа назовем знаменитые часы «яичной» формы с театральным автоматом И. П. Кулибина (1735—1818). В 1820 г. в Петербурге был открыт «Храм очарований» А. И. Галулецкого, обслуживаемый механическими слугами. В 1866 г. И. Мезгин создал «астрономо-исторические» часы, которые помимо времени показывали четыре сценки из истории г. Томска.

Идеи создания «механических» людей, начавшие было затухать вместе с ослаблением роли часового дела в дальнейшем развитии техники, вновь возродились в 20 в. на основе электроники и электротехники. Американский инженер Венсли построил управляемый на расстоянии с помощью свистка автомат «Телевокс», который мог не только выполнять ряд элементарных операций, но и произносить с помощью звукозаписывающей аппаратуры несколько фраз. Англичанин Гарри Мей в 1932 г. создал человекоподобный автомат «Альфа», который по командам, подаваемым голосом, садился, вставал, двигал руками, говорил. Несколько подобных автоматов под названием «Сабор» были построены в Австрии Августом Губером. Они имели управление по радио, могли ходить,

говорить, выполнять различные манипуляции. В основном подобные устройства создавали в рекламных целях, хотя делались попытки использовать их и для различных практических целей.

Любопытно напомнить, что в 1937 г. на Всемирной выставке в Париже демонстрировался радиоуправляемый подвижный робот, созданный советским восьмиклассником В.Машкевичем. К этому времени уже окончательно «прижился» термин «робот», а идеи робототехники все более энергично использовались в научно-фантастической литературе.

## **1.2. Возникновение и развитие современной робототехники**

Как уже было указано, современная робототехника возникла во второй половине XX столетия, когда в ходе развития производства появилась реальная потребность в универсальных манипуляционных машинах-автоматах, подобных «механическим людям», описанным К. Чапек, и одновременно были созданы необходимые для их создания научно-технические предпосылки и прежде всего кибернетика и вычислительная техника.

Современными предшественниками роботов явились различного рода устройства для манипулирования на расстоянии объектами, непосредственный контакт человека с которыми опасен или невозможен. Это манипуляторы с ручным и автоматизированным управлениями. Первые из них были пассивными, т.е. механизмами без приводов, и служащими для повторения на некотором расстоянии движений руки человека целиком за счет его мускульной силы. Затем были созданы манипуляторы с приводами и различными вариантами управления человеком вплоть до биоэлектрического.

Первые такие манипуляторы были созданы в 1940—1950 гг. для атомных исследований, а затем для атомной промышленности (рис.1.3 и 1.4). Подобные манипуляторы получили также применение в глубоководной технике, металлургии и ряде других отраслей промышленности.

Первые полностью автоматически действующие манипуляторы были созданы в США в 1960—1961 гг. В 1961 г. был разработан такой манипулятор, управляемый от ЭВМ и снабженный захватным устройством, осязательным с помощью различного типа датчиков — контактных и фотоэлектрических. Этот манипулятор МН-1 получил название «рука Эрнста» по фамилии его создателя Г. Эрнста [1]. По современному определению, это был прообраз осязательного робота второго поколения с адаптивным управлением, что позволяло ему, например, находить и брать произвольно расположенные предметы.

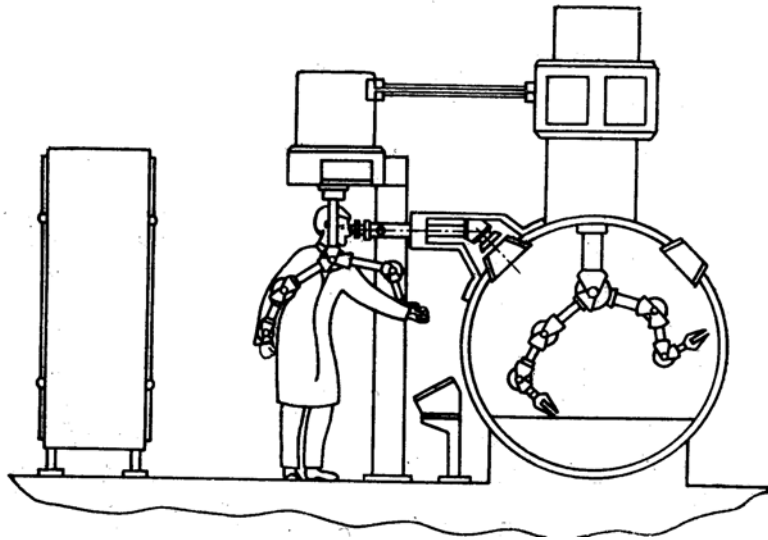


Рис. 1.3. Горячая камера с копирующим манипулятором.



Рис.1.4. Копирующий манипулятор Маскот фирмы «Телеробот» (Италия).

В 1962 г. на рынке США появились первые роботы марки «Весотран» (фирмы «Америкэн мэшин энд фаундри»), предназначенные для промышленного применения (рис. 1.5).

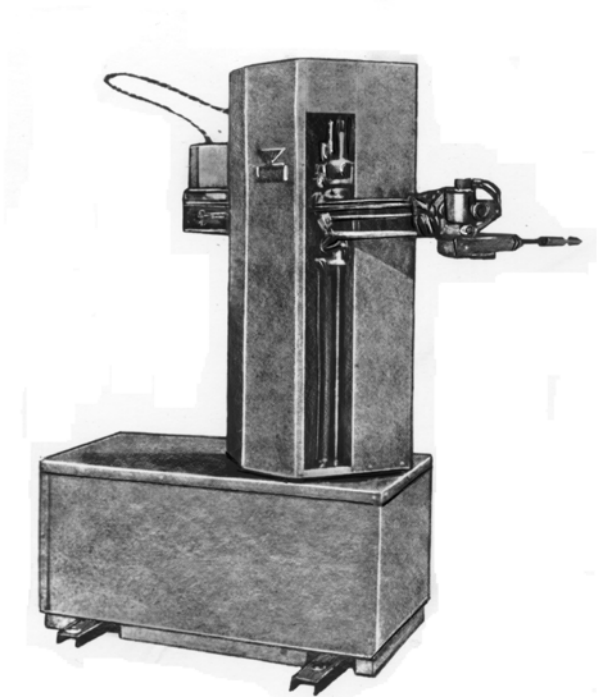


Рис. 1.5. Один из первых промышленных роботов «Весотран».

Одновременно возник термин «промышленный робот», по-видимому, предложенный этой фирмой. В то же время в США появились роботы «Юнимейт-1900», которые получили первое применение в автомобильной промышленности на заводах фирм «Дженерал моторс», «Форд» и «Дженерал электрик» (рис. 1.6).

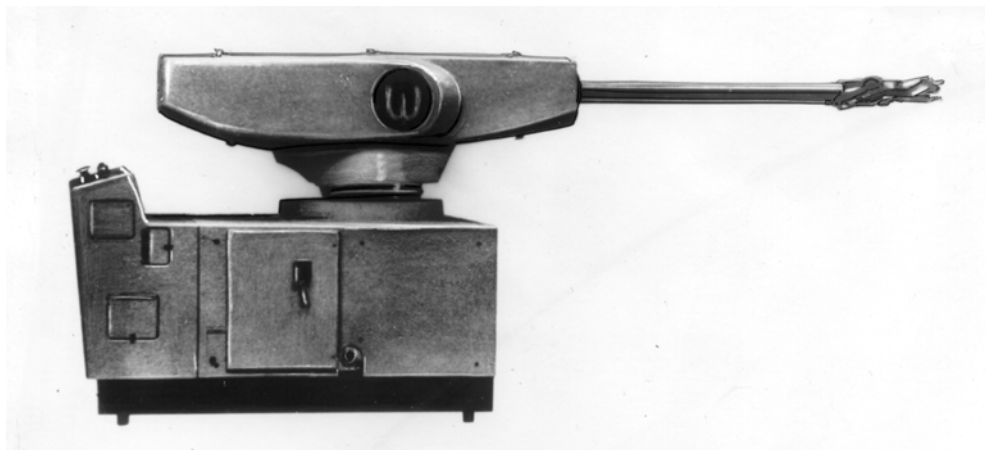


Рис. 1.6. Один из первых промышленных роботов «Юнимейт».

Хронология дальнейшего развития производства роботов за рубежом такова: в 1967 г. начат выпуск роботов в Англии по лицензии США, в 1968 г. — в Швеции и Японии (тоже по лицензиям США), в 1971 г. — в ФРГ, в 1972 г. — во Франции, в

1973 г. — в Италии. Динамика роста парка роботов в мире выглядит следующим образом:

год	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Количество роботов (тыс.шт.)	8,5	30	90	400	800	~1200

В среднем в год парк роботов возрастает на 20-30% и в 1998 году он впервые превысил 1 млн.шт.

Первое место в мире по производству и применению роботов уверенно занимает Япония, где сосредоточена большая часть мирового парка роботов. Далее следуют США, Италия, Франция, Швеция. Большая часть этого парка используется в промышленности, примерно половина – на основных технологических операциях, где требуются наиболее сложные роботы. Доля таких роботов неуклонно растет.

Технический прогресс в развитии роботов идет прежде всего в направлении совершенствования систем управления. Первые промышленные роботы имели программное управление, в основном заимствованное от станков с числовым программным управлением (ЧПУ). От них же были взяты приводы. Эти роботы получили название роботов первого поколения. Второе поколение роботов – роботы с адаптивным управлением. Это очувствленные роботы, т.е. снабженные сенсорными системами, главными из которых являются системы технического зрения (СТЗ).

Первые промышленные роботы с развитым очувствлением, включая техническое зрение, и микропроцессорным управлением появились на рынке и начали получать практическое применение в 1980 – 1981 гг. прежде всего на сборке, дуговой сварке, контроле качества, для взятия неориентированных предметов, например, с конвейера. Это снабженные видеосистемами роботы «Пума», «Юнимейт», «Ауто-плейс», «Цинциннати милакрон», «Аид-800», сборочные робототехнические системы фирм «Хитачи», «Вестингауз» (система «Апас»), «Дженерал моторс» (система «Консайт»). Доля таких роботов в общем парке роботов неуклонно растет и приближается к 50% несмотря на то, что эти роботы в несколько раз дороже роботов с программным управлением и значительно сложнее в обслуживании. Однако это окупается неизмеримо большими функциональными возможностями, а, следовательно, и областями применения.

Третье поколение роботов – это интеллектуальные роботы, т.е. с интеллектуальным управлением. Пока эти роботы – предмет исследований и опытных разработок.

В 1967 г. в США (Станфордский университет) был создан лабораторный макет робота, снабженного техническим зрением и предназначенного для исследования и отработки системы «глаз — рука», способной распознавать объекты внешней среды и оперировать ими в соответствии с заданием [1].

В 1968 г. в СССР (Институтом океанологии Академии наук СССР совместно с Ленинградским политехническим институтом и другими вузами) был создан телеуправляемый от ЭВМ подводный робот «Мантa» с очувствленным захватным устройством, а в 1971 г. — следующий его вариант с техническим зрением и системой целеуказания по телевизионному экрану (рис.1.7) [2].

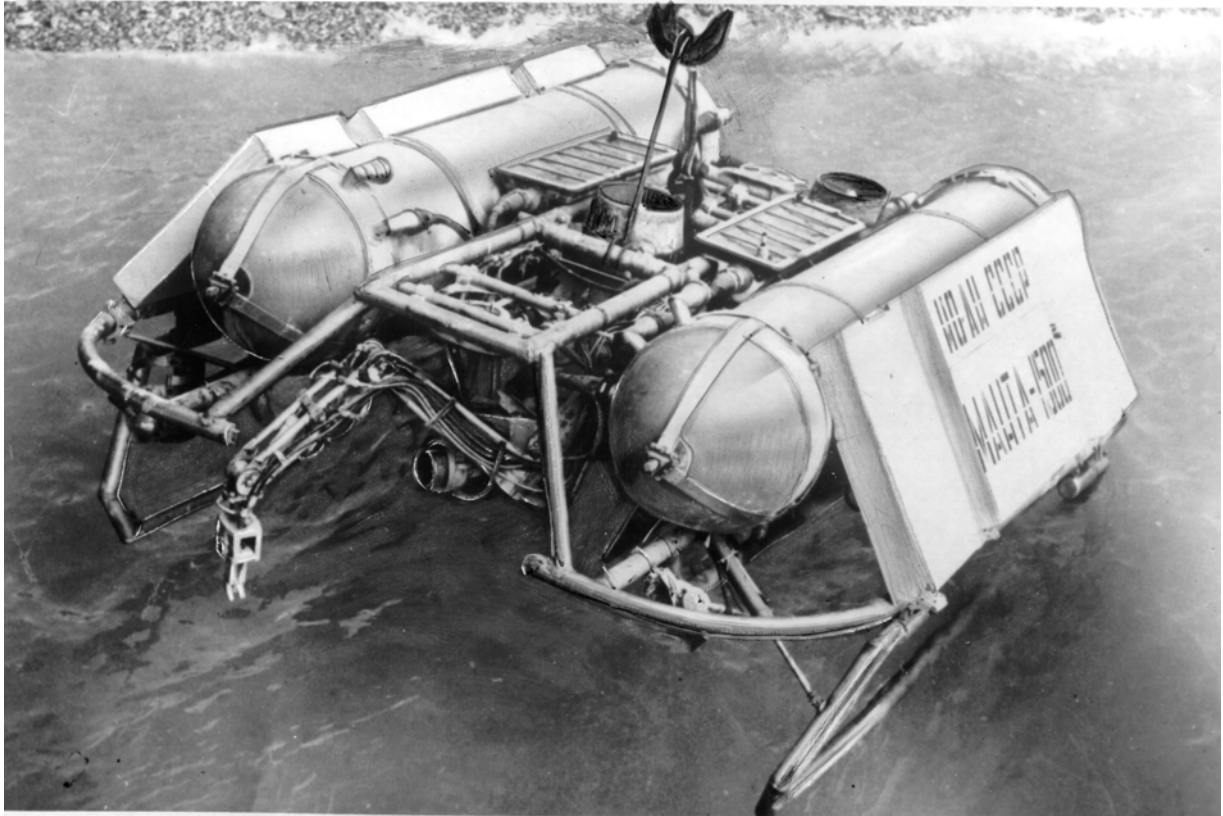


Рис.1.7. Один из первых отечественных подводных роботов «Мантa» с техническим зрением и манипулятором, управляемым от ЭВМ.

В 1969 г. в США (Станфордский научно-исследовательский институт) в рамках работ по искусственному интеллекту был разработан экспериментальный макет подвижного робота «Шейки» с развитой системой сенсорного обеспечения, включая техническое зрение, обладавшего элементами искусственного интеллекта, что позволило ему целенаправленно передвигаться в заранее неизвестной обстановке, самостоятельно принимая необходимые для этого решения (рис. 1.8).



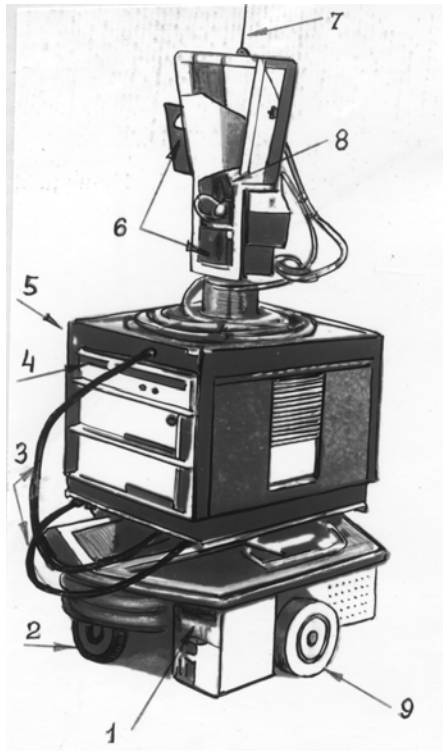


Рис. 1.8. Лабораторный интегральный подвижный робот СРИ («Шейки») Станфордского научно-исследовательского института (США): 1 – привод колеса 9; 2 – ролик; 3 – датчик контакта; 4 – устройство управления телевизионной камерой; 5 – бортовое устройство управления роботом, связанное со стационарной ЭВМ; 6 – неподвижный оптический дальномер; 7 – антенна системы радиосвязи; 8 – подвижная телевизионная камера; 9 – одно из двух мотор-колес.

В 1971 г. в Японии также были разработаны экспериментальные образцы роботов с техническим зрением и элементами искусственного интеллекта: робот «Хивип», способный самостоятельно осуществлять механическую сборку простых объектов по предъявленному чертежу (рис.1.9), и робот ЭТЛ-1 (рис.1.10).

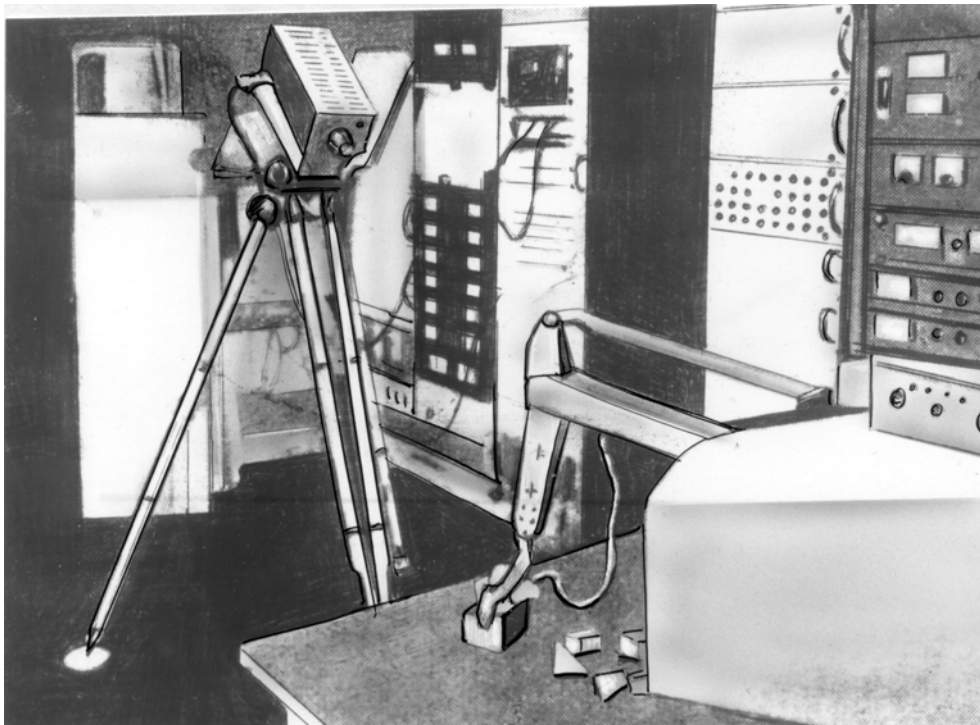


Рис. 1.9. Экспериментальный робот «Хивип» для механической сборки простых объектов по чертежу Центральной научно-исследовательской лаборатории фирмы «Хитачи» (Япония).





Рис.1.10. Экспериментальный Электромеханический робот ЭТЛ-1 электротехнической лаборатории ЭТЛ (Япония).

В этот период и в ряде других стран создают подобные экспериментальные установки, так называемые интегральные роботы, включающие манипуляторы, управляющие ЭВМ, различные средства осязания и общения с человеком-оператором, которые предназначены для проведения исследований в области создания роботов следующих поколений, а также искусственного интеллекта [1].

Одновременно развернулись работы в новой специфической области робототехники — шагающие машины как принципиально новое транспортное средство повышенной проходимости, образцом для которого являются ноги животных и человека. Были созданы экспериментальные образцы четырех- и шестиногих транспортных машин, протезов ног человека, так называемых экзоскелетов, для парализованных и тяжелобольных (рис. 1.11) [3,4].

Как уже упоминалось во введении, одним из основных направлений применения роботов, которое в значительной мере определяет темпы и проблематику развития современной робототехники в целом, являются гибкие автоматизированные производства прежде всего в машиностроении. Роботы, как универсальное гибкое средство для выполнения манипуляционных действий — важный компонент таких производств.

История гибкой автоматизации началась в 1955 г. с появлением станков с ЧПУ. Именно такого типа автоматическое технологическое оборудование с быстроменяемыми программами работы является основой для создания гибких, т.е. быстро перестраиваемых на выпуск новой продукции, производств. Однако для реализации идеи гибкой автоматизации, был необходим еще ряд условий. Этим и объясняется, что первые станки с ЧПУ распространялись очень медленно. За десять лет их доля в общем парке станков в технически передовых странах не

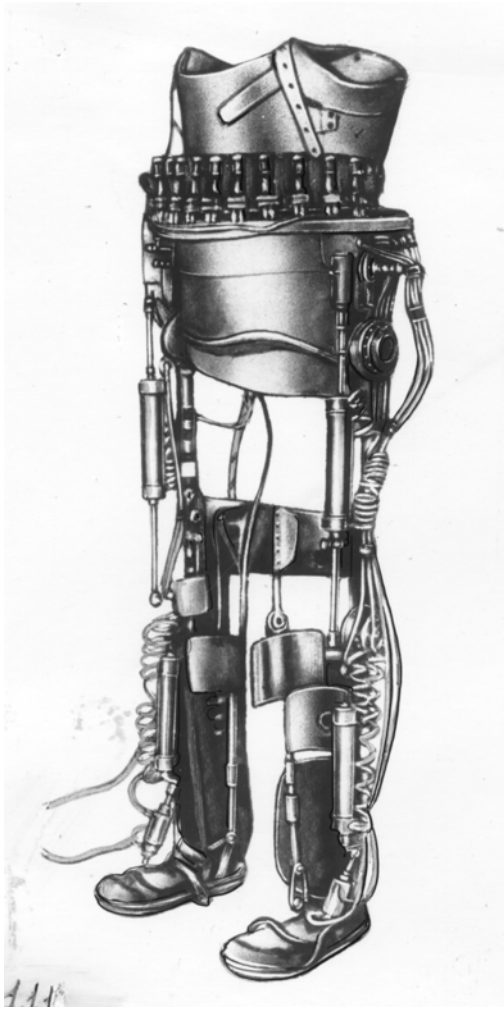


Рис.1.11. Экзоскелетон.

достигла и 0,1 %. Ситуация резко изменилась в 70-ые годы с появлением следующего важнейшего компонента гибкой автоматизации – микропроцессорных систем управления, что обеспечило резкое снижение стоимости систем ЧПУ и повышение их надежности.

Роботы как другой обязательный компонент гибкой автоматизации появились в промышленности, как уже было указано, несколько раньше. В результате появились все необходимые компоненты для развития гибких автоматизированных производств, а именно: технологическое оборудование с программным управлением, микропроцессоры как универсальное гибкое средство для обработки информации и роботы как универсальное гибкое средство для манипуляционных действий, требующихся при выполнении основных технологических операций (сборки, сварки, окраски

и т.п.) и различных вспомогательных операций по обслуживанию другого оборудования.

Одновременно роботы начинают все более широко проникать и в другие отрасли хозяйства, включая горное дело, металлургию, строительство, транспорт, легкую и пищевую промышленность, сельское хозяйство, медицину, сферу обслуживания, освоение океана и космоса, военное дело. В последние годы все ускоряющимися темпами растет доля парка роботов, занятых вне промышленности и, в частности, в быту.

Почти во всех технически развитых странах созданы национальные ассоциации по робототехнике. В ряде стран имеются финансируемые государством национальные программы по этой проблеме. Развиваются такие программы на международном уровне.

### 1.3. Развитие отечественной робототехники

Первые серьезные результаты по созданию и практическому применению

роботов в СССР относятся к 60-м годам. В 1966 г. в институте ЭНИКмаш (г. Воронеж) был разработан автоматический манипулятор с простым цикловым управлением для переноса и укладывания металлических листов. Первые промышленные образцы современных промышленных роботов с позиционным управлением были созданы в 1971 г. (УМ-1, «Универсал-50», УПК-1). В 1968 г., как уже упоминалось, был создан первый управляемый от ЭВМ подводный автоматический манипулятор. В 1971г. в Ленинградском политехническом институте был создан экспериментальный образец интегрального робота, снабженного развитой системой очувствления, включая техническое зрение и речевое управление (рис. 1.12) [2]. В том же году в Ленинграде состоялся первый Всесоюзный семинар по роботам, управляемым от ЭВМ.

Начиная с 1972 г. работы в области робототехники приняли плановый характер в масштабе страны. В 1972 г. Постановлением Госкомитета СССР по науке и технике была сформулирована проблема создания и применения роботов в машиностроении как государственно важная задача и определены основные направления ее решения. В следующем году была утверждена первая программа работ по этой проблеме, которая охватила основные отрасли промышленности и ведомства, включая Академию наук и высшую школу. В соответствии с этой программой к 1975 г., были созданы первые 30 серийно пригодных промышленных роботов, в том числе универсальных (для обслуживания станков,

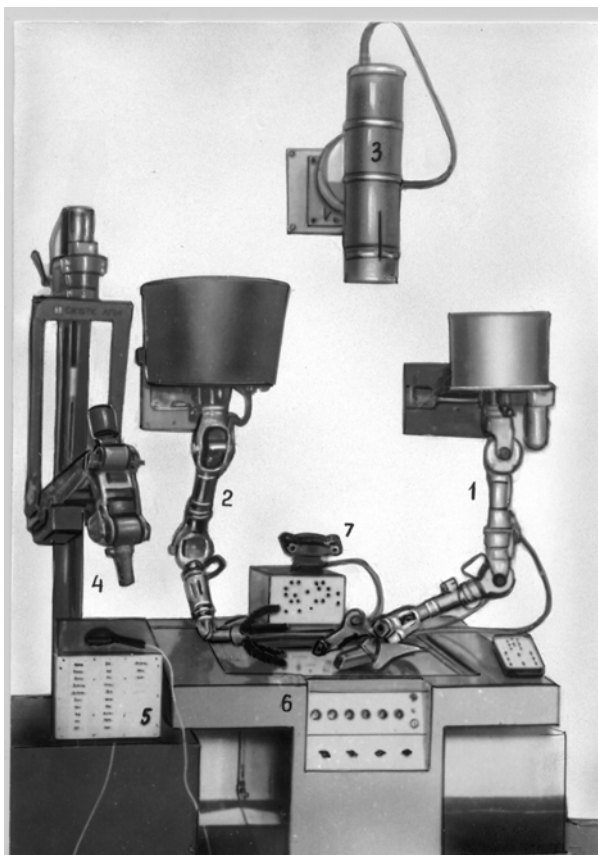


Рис.1.12. Экспериментальный интегральный робот ЛПИ-2: 1, 2 – электромеханические манипуляторы со съемными очувствленными схватами; 3 – телевизионная камера; 4 – задающая рукоятка для ручного управления; 5 – речевое командное устройство; 6 – очувствленный стол с фотодиодными линейками; 7 – ультразвуковой локатор.

прессов, для нанесения покрытий и точечной сварки) на пневмо-, гидро- и электроприводах, стационарных и подвижных. В следующей пятилетке эта работа была продолжена на основе новой пятилетней программы. Было создано более 100

марок промышленных роботов и организовано серийное производство 40 марок. Одновременно были начаты работы по унификации и стандартизации промышленных роботов по соответствующей программе Госстандарта СССР.

Фундаментальные и поисковые работы в области робототехники были развернуты на основе программ Академии наук и высшей школы, которые были увязаны с комплексной программой Госкомитета СССР по науке и технике.

К концу 1980 г. парк промышленных роботов в стране превысил 6000 шт., что находилось, например, на уровне парка роботов США, и составляло более 20% парка роботов в мире, а к 1985 г. превысил 40 тыс.шт., в несколько раз превзойдя парк роботов США и достигнув 40 % мирового парка.

Первые промышленные роботы второго поколения со средствами очувствления появились в отечественной промышленности на сборочных операциях в приборостроении с 1980 г. Первый промышленный робот с техническим зрением МП-8 был создан в 1982 г. [2].

В 1975 г впервые был начат выпуск инженеров по робототехнике в Ленинградском политехническом институте в рамках существующих специальностей. В 1981 г. была введена новая специальность инженера-электромеханика «Робототехнические системы» и организована их подготовка в ряде ведущих вузов страны.

К сожалению, с распадом СССР вся эта плановая работа по развитию отечественной робототехники на государственном уровне прекратилась. Практически прекратилось серийное производство роботов. Их парк сократился более чем на порядок вместе с сокращением производства в стране в целом. В результате к 1995 г. разработки и применение роботов в России сузилось до задач обеспечения работ в экстремальных ситуациях (стихийные бедствия, аварии, борьба с террористами и т.п.), когда без роботов задача не может быть решена. Правда, в этой сфере отечественная робототехника не только не потеряла ранее достигнутого научно-технического уровня, но и продолжает развиваться, в том числе путем участия в различных международных проектах и программах. На рубеже 2000 года начали возрождаться отраслевые и ведомственные научно-технические программы по робототехнике и межотраслевые по линии Миннауки по отдельным особо государственно важным ее аспектам. Все это позволяет надеяться на будущее возрождение отечественной робототехники в полном объеме по мере восстановления нашей экономики и народного хозяйства.

## **Глава 2. Управление движением человека**

### **2.1. Постановка задачи.**

С самого начала своего зарождения и до настоящего времени образцом для робототехники являются возможности живых организмов и, прежде всего, конечно, человека, особенно его рук. Создаваемые сегодня роботы очень далеки по своим основным характеристикам (энергетическим, информационным, по управляемости, надежности, компактности и т. д.) от объектов живой природы. Поэтому живая природа для робототехники еще долго будет служить источником идей и образцом для заимствования.

Кроме того, существует серьезная проблема создания технических средств, заменяющих отдельные подвижные части организма человека, т. е. проблема протезирования. Наконец, в ряде применений средства робототехники должны действовать в органическом единстве с человеком. В связи с этими обстоятельствами также требуется знать, как организованы движения в живой природе и как они управляются. В настоящей главе даны сведения по этому вопросу применительно прежде к человеку и его главному манипуляционному средству — руке, излагаемые с позиций современной робототехники.

В приложениях приведены некоторые сведения об эволюции движения в живой природе.

### **2.2. Общая схема системы управления движением человека.**

На рис. 2.1 показана обобщенная функциональная схема системы управления движениями тела человека, в которую входят пассивная часть системы — скелет, ее активная (движущая) часть — мышцы, чувствительные устройства — рецепторы и информационно-управляющая система — центральная нервная система (ЦНС). Скелет (его часть, которая участвует в движении) представляет собой вместе с мышцами объект управления в виде подвижно соединенных костных звеньев, образующих с позиций механики многозвенные кинематические цепи, подобные манипуляторам роботов.

Основное назначение этих систем управления — поддержание позы, ориентация (на объекты внешней среды), перемещение тела в пространстве — локомоции и, наконец, манипуляции. Рассмотрим составные части схемы на рис. 2.1.

**Нейроны.** Это нервные клетки, являющиеся “элементной базой” рассматриваемых систем управления. Существует много типов нейронов, специализирующихся на восприятии внешней информации, ее преобразовании, хранении, передаче и, наконец, воздействии на мышцы и железы. В организме человека миллиарды нейронов, которые соединены в нейронную сеть, охватывающую все тело.

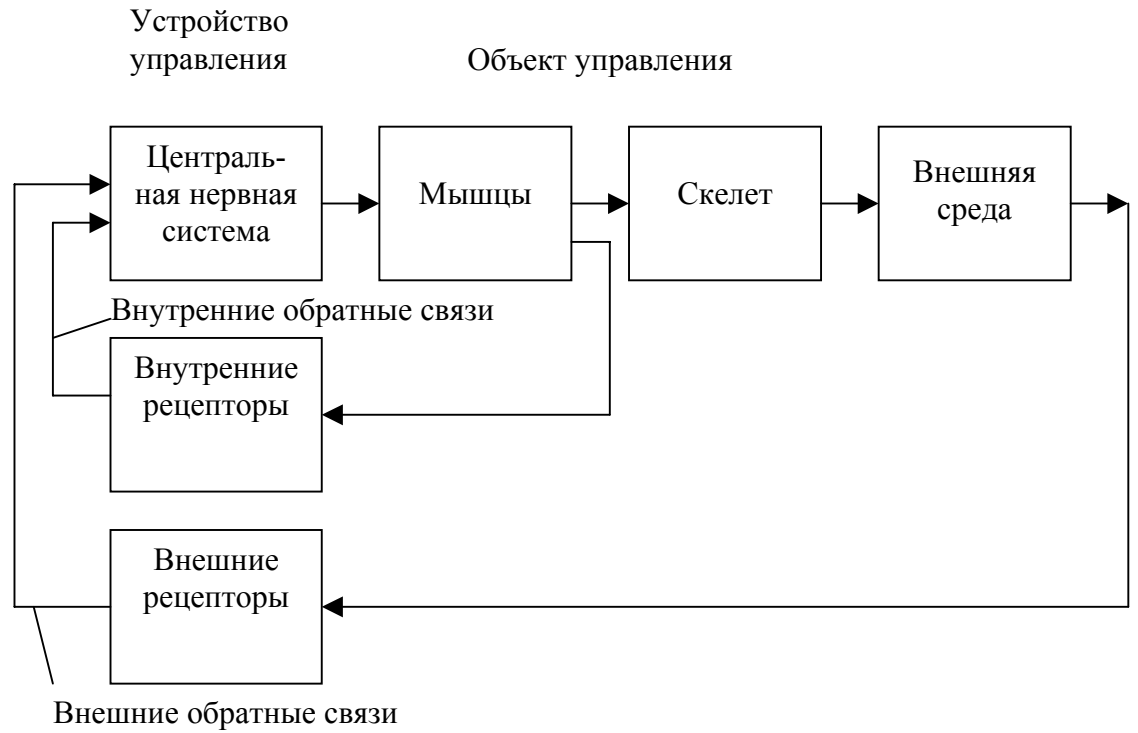


Рис.2.1. Функциональная схема системы управления движениями тела человека.

Нейрон (рис.2.2) состоит из тела – сомы, дендритов – отростков, которые воспринимают входные воздействия от других нейронов, и аксонов — ветвящихся отростков, которые передают выходные воздействия другим нейронам и различным клеткам. Аксоны заканчиваются концевыми утолщениями – синапсами на дендритах и теле других клеток. Длина отдельных аксонов соизмерима с размерами тела человека (например, аксоны, идущие от спинного мозга до пальцев ноги). Один нейрон может иметь тысячи входов от других нейронов и сотни

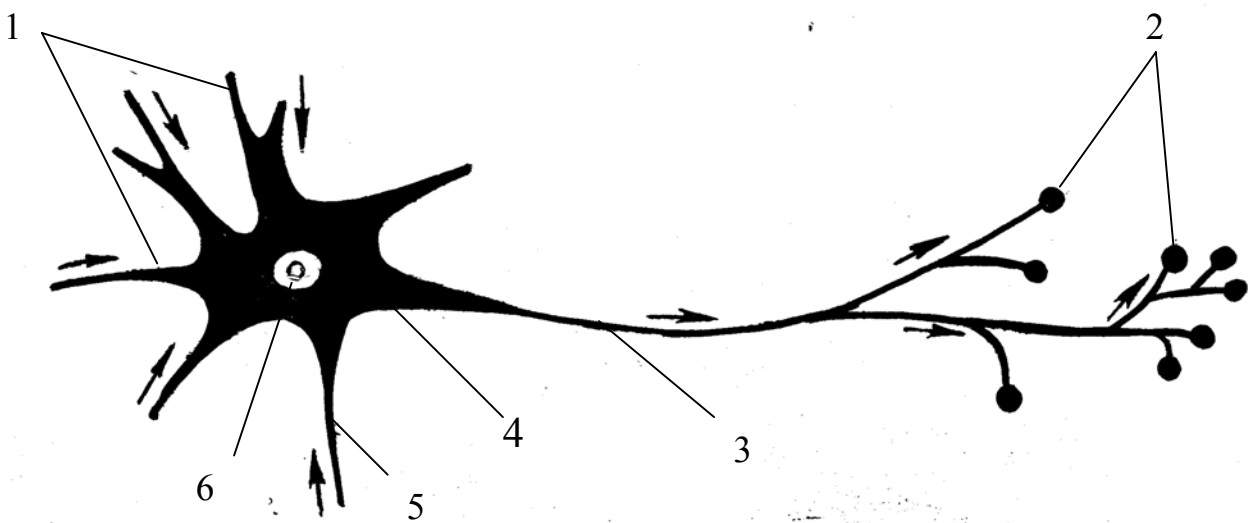


Рис.2.2. Строение нейрона: 1 – дендриты; 2 – синапсы; 3 – аксон; 4 – аксонный холмик; 5- синапс другой клетки; 6 – тело клетки.

импульсов длиной примерно 1 мс со скоростью 50-100 м/с. Нейроны имеют определенный порог чувствительности, при превышении которого они возбуждаются и генерируют импульсы на выходе, которые распространяются по аксону. После этого требуется определенное время для возвращения нейрона в исходное состояние. Это так называемый рефрактерный период, в течение которого происходит химическое восстановление соответствующего аксона после проведения им очередного импульса. Нейрон может возбуждаться одним большим импульсом, который превышает порог чувствительности, или совокупностью нескольких малых импульсов, которые поступят на один или разные входы за время, меньше рефрактерного периода.

Входной сигнал воздействует на клетку, изменяя потенциал ее мембраны. При этом он может как увеличить этот потенциал, возбуждая клетку, так и уменьшить его, осуществляя ее торможение.

Таким образом, нейрон осуществляет пространственно-временное суммирование входных сигналов, восстанавливает их интенсивность, выдавая выходные сигналы определенной интенсивности, и передает их через свои аксоны другим клеткам. Аксоны нейронов объединяются в пучки, образуя стволы или нервы.

**Мышцы.** Тело человека приводится в движение с помощью поперечнополосатых мышц. Их основу составляет так называемый анизотропный элемент (диск) в виде круглой пластинки размером в красное кровяное тельце. Под действием управляющего сигнала этот элемент резко сокращается (в течение около 1 мс). После этого для возврата в исходное состояние ему требуется примерно вдвое-втрое большее время. Таким образом, он представляет собой импульсный элемент с существенным мертвым временем.

Для создания длительного непрерывного изменения усилия соединенные в цепочку анизотропные элементы перемежаются изотропными элементами из упругой сухожильной ткани. Эти изотропные элементы играют роль амортизаторов, быстро растягиваясь при импульсном сжатии анизотропных элементов, а затем плавно возвращаясь в исходное состояние. Цепочки анизотропных и изотропных элементов образуют волокна. Из этих волокон, объединенных в пучки по 10-15 волокон, и состоит мышца.

В зависимости от быстродействия и развиваемого усилия различают три группы волокон:

быстро сокращающиеся и развивающие большое усилие, но быстро утомляющиеся волокна;

быстро сокращающиеся, но развивающие меньшее усилие, зато более выносливые волокна;

медленно сокращающиеся и развивающие небольшое усилие, но наиболее выносливые волокна.

В одном пучке могут находиться волокна разных типов. Время сокращения волокон лежит в пределах 10—200 мс, а развиваемое ими усилие – от 0,1 до 100 г.

Управление мышцей осуществляется специальными двигательными нейронами — мотонейронами. Каждому мотонейрону подчинены волокна одного

типа, которые распределены по разным пучкам мышцы. Для этого к каждому пучку подходит отдельный аксон этого мотонейрона и его синапсы расположены на входящих в этот пучок волокнах данного типа. Объединенные таким образом по управлению однотипные волокна, принадлежащие одному пучку, называют двигательной единицей. В каждую двигательную единицу может входить от нескольких единиц до тысяч однотипных волокон.

Благодаря двигательным единицам, подчиненным одному мотонейрону в разных пучках мышцы, один мотонейрон может привести в действие всю мышцу, создав усилие, определяемое количеством и типом подчиненных ему волокон. При этом чем тоньше совершаемые мышцей движения, тем меньшее число волокон приходят на один мотонейрон.

Усилие, развиваемое мышцей в целом, определяется общим количеством введенных в действие волокон, а необходимая плавность движения обеспечивается путем включения в действие в ходе выполнения движения все новых волокон. Управление мышцей осуществляется сериями импульсов следующих от мотонейронов с частотой 50-200 импульсов в секунду. В зависимости от количественного соотношения входящих в мышцу волокон разных типов получают соответственно мышцы разного типа от быстродействующих до медленнодействующих, но более выносливых.

Таким образом, в целом, мышца — это сложного состава двигатель, состоящий из большого числа (до нескольких тысяч) параллельно включенных элементарных импульсных двигателей — волокон, «конструктивно» объединенных в пучки, а по управлению — в двигательные единицы разного типа. Требуемое изменение во времени мышечного усилия обеспечивается при этом путем последовательного включения в определенные моменты времени различного числа двигательных единиц разных типов.

На рис.2.3 показана типичная зависимость силы, развиваемой мышцей от скорости движения <sup>1/</sup>. Здесь  $f$ ,  $v$  и  $u$  — относительные значения (отношения абсолютного значения к максимальному) соответственно силы, скорости и управляющего воздействия, которое определяет возбуждение мышцы, а  $k$  — коэффициент, принятый равным 5.

Мощность, развиваемая мышцей человека при постоянном управляющем воздействии, максимальна при средних значениях силы и скорости и падает до нуля при максимальном значении каждой из этих величин (см. на рис.2.3 штриховую кривую, соответствующую постоянному значению мощности). Среднее значение мощности, развиваемой мышцей человека, составляет около 20 Вт. При этом поперечнополосатая мышца — это двигатель одностороннего (неревверсивного) действия, т.е. по внешнему сигналу она может только сокращать-

---

<sup>1/</sup> Янг Дж.Ф. Робототехника. Л., Машиностроение, 1979



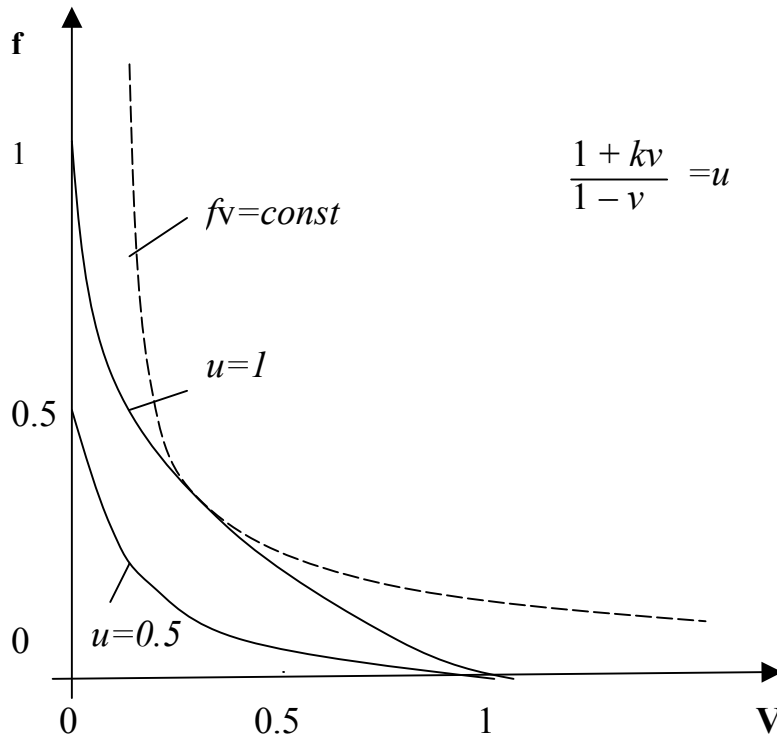


Рис.2.3. Зависимость силы, развиваемой мышцей человека, от скорости движения.

ся, создавая усилие в одном направлении. Поэтому мышцы крепятся к костям по балансной схеме, образуя пары противоположно действующих мышц-антагонистов (рис.2.4). Когда одна из этих мышц, сокращаясь, осуществляет относительное перемещение костей в одном направлении, другая мышца растягивается, подготавливаясь к выполнению движения в противоположном направлении.

**Рецепторы.** Это — чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в соответствии с источниками собираемой ими информации. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Рецепторы — это чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в соответствии с источником собираемой ими информации. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Внешние рецепторы — это прежде всего пять основных органов чувств (зрение, слух, осязание,

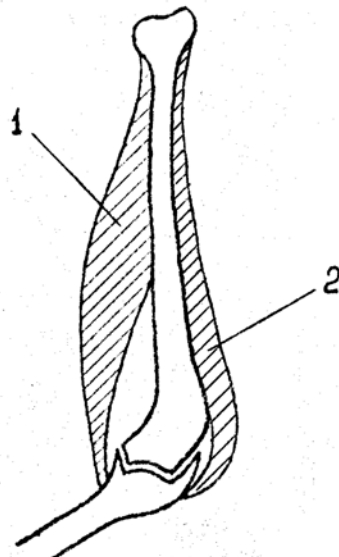


Рис.2.4. Крепление мышц-антагонистов: 1 — мышца-сгибатель; 2 — мышца-разгибатель.

обоняние, вкус), а также множество таких рецепторов, как расположенные в коже температурные рецепторы, рецепторы давления, болевые и др. Кроме того, сюда относится вестибулярный аппарат в височной кости, который определяет положение тела в пространстве и ускорение.

Особенностью органов чувств является предварительная обработка в них информации до передачи ее в головной мозг. Внутренние рецепторы (интероцепторы) дают информацию о состоянии двигательного аппарата, а также желез и внутренних органов. Интересующие нас рецепторы первого типа делятся на мышечные рецепторы растяжения, сухожильные и механорецепторы суставов и кожи.

Мышечные рецепторы размещены в мышце и дают информацию о длине мышцы и скорости ее изменения, сухожильные — об усилии и скорости его изменения, суставные — о значении суставного угла, скорости и ускорении его изменения.

Мышечные рецепторы устроены следующим образом. В мышце помимо основных (силовых) мышечных волокон, называемых экстрафузальными, которые были рассмотрены выше, имеются мелкие (информационные) волокна, называемые интрафузальными. Длина этих волокон изменяется вместе с экстрафузальными волокнами и измеряется с помощью расположенных в них особых рецепторов, называемых мышечными веретенами. Информация от них передается затем в спинной мозг в виде величины отклонения длины мышцы от заданного ее значения («уставки»), полученного управляющими этой мышцей мотонейронами спинного мозга. Для определения этого отклонения наряду с основными мотонейронами, называемыми  $\alpha$ -мотонейронами, имеются специальные мотонейроны —  $\gamma$ -мотонейроны, которые управляют интрафузальными волокнами по сигналам, поступающим на них одновременно с сигналами, идущими к  $\alpha$ -мотонейронам.

**Центральная нервная система.** Устройство центральной нервной системы показано на рис.2.5, а ее состав дан на рис.2.6. Если некоторые части мозга имеют достаточно четкие границы, например, мозжечок, то другие постепенно переходят друг в друга.

Передний мозг состоит из конечного мозга и промежуточного мозга. В конечный мозг входят большие полушария, включая «новую кору», которая у человека превосходит всю остальную часть мозга и имеет толщину в 60—100 нейронов. Чтобы поместиться в черепе, она имеет складки (борозды). Соединены полушария мозолистым телом и другими нервными путями. В каждом полушарии различают четыре доли: лобную, височную, теменную и затылочную. В коре имеется сенсо-моторная область, которая состоит из связанных сенсорных областей (соматосенсорной, получающей информацию от внутренних рецепторов, зрительной, слуховой и обонятельной) и моторной области.

Входящая в конечный мозг лимбическая система объединяет информацию от отдельных органов чувств и играет важную роль в поведении, направленном на выживание (питание, чувство опасности, агрессивность, размножение). Находится лимбическая система под большими полушариями перед стволом мозга, как и промежуточный мозг, через который реализуются ее сигналы.

---

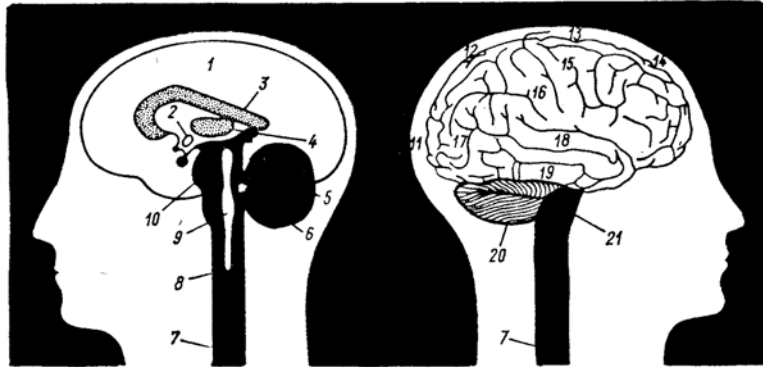


Рис.2.5. Устройство центральной нервной системы: 1 — новая кора; 2 — гипоталамус; 3 — мозолистое тело; 4 — таламус; 5 — мозжечок; 6 — вестибулярные ядра; 7 — спинной мозг; 8 — продолговатый мозг; 9 — ретикулярная формация; 10 — варолиев мост; 11 — затылочная доля; 12 — теменная доля; 13 — центральная борозда; 14 — лобная доля; 15 — двигательная кора; 16 — соматосенсорная кора; 17 — зрительная кора; 18 — слуховая кора; 19 — обонятельная кора; 20 — мозжечок; 21 — ствол, мозга.

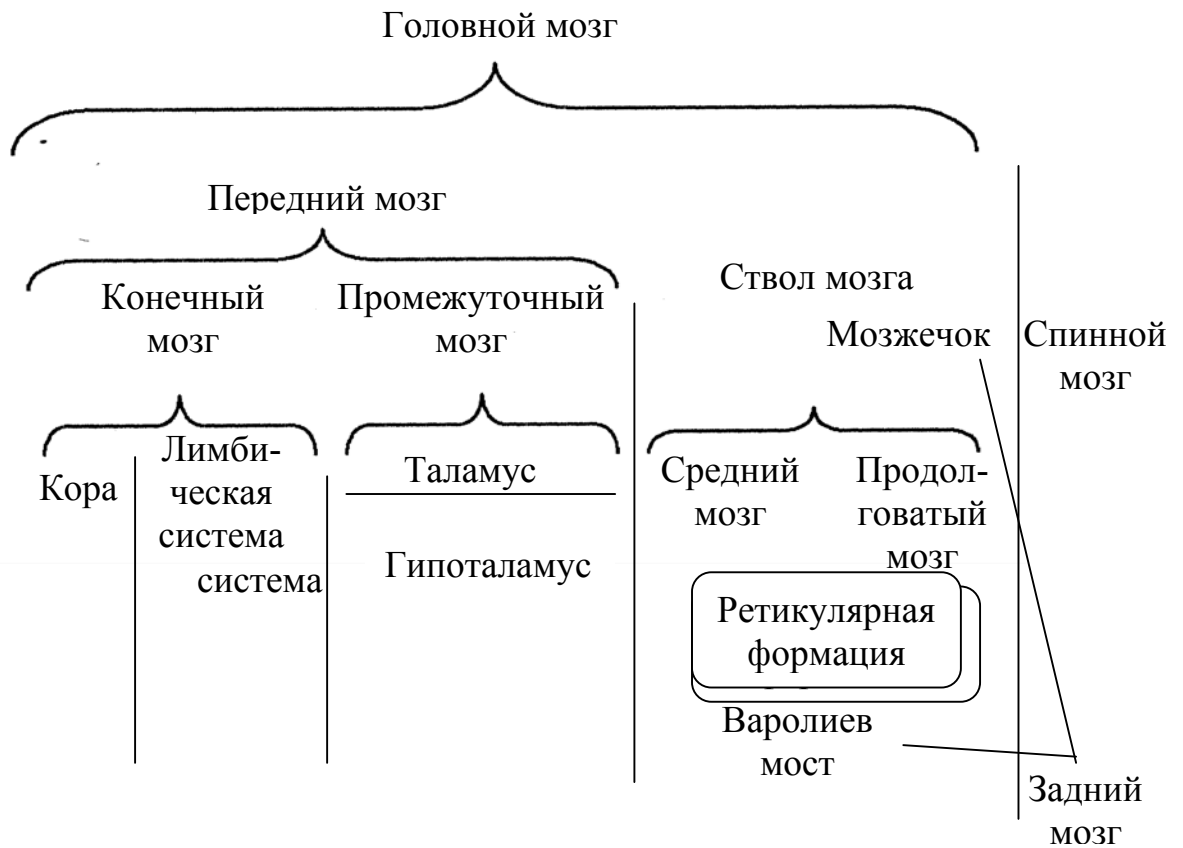


Рис.2.6. Состав центральной нервной системы.

Промежуточный мозг включает таламус и гипоталамус. В таламусе осуществляется промежуточная обработка идущей к коре сенсорной информации (кроме обонятельной, которая обрабатывается в гипоталамусе) и части идущей обратно («вниз») моторной информации. Гипоталамус вместе с лимбической системой определяет эмоциональное и мотивационное поведение (кроме того, здесь контролируются биохимические процессы — солевой обмен, кровяное давление, дыхание, температура, водный баланс, чувства голода и насыщения, эндокринная система)

Ствол мозга управляет зрительными, слуховыми и двигательными рефлексам. Через ствол мозга проходят вверх и вниз пути, связанные с рефлекторной и двигательной деятельностью.

Ретикулярная формация ствола мозга, которая, вероятно, была когда-то высшим уровнем нервной регуляции, ответственна за выбор типа поведения (бежать от опасности или нападать и т. п.), регулирует чередование сна и бодрствования, обеспечивает устойчивость позы, т. е. компенсацию влияния силы тяжести.

Мозжечок вместе с варолиевым мостом образует задний мозг. Через них проходят информационные пути вверх и вниз. Кроме того, мозжечок обеспечивает координацию движений, поддерживает тонус и регуляцию мышц.

Продолговатый мозг является продолжением спинного мозга в черепе. Через него из спинного мозга вверх идет информация о положении частей тела и мышечном тонусе, а вниз — двигательные сигналы. (Кроме того, продолговатый мозг участвует в регуляции сердечно-сосудистой системы, дыхания, пищеварения, равновесия).

Спинной мозг расположен в позвоночнике и разделен на сегменты, которые управляют отдельными частями тела. Для этого в каждом сегменте имеются сенсорные нервные клетки и управляющие мышцами мотонейроны. Сегменты соединены нервными волокнами, которые идут вверх и вниз вдоль спинного мозга. Прежде чем перейти к рассмотрению взаимодействия частей мозга при управлении движением, рассмотрим, как осуществляется обработка информации от внешних рецепторов на примере зрительной и слуховой информации. На рис.2.7 приведена схема зрительной системы. Импульсы светочувствительных клеток сетчатки глаза (палочек и колбочек) предварительно преобразовываются двумя последующими слоями клеток сетчатки (ганглиозными клетками) и по зрительному нерву, образованному аксонами этих клеток, идут в мозг. Поступает зрительная информация в два адреса: во-первых, по более древнему пути — в средний мозг (тектум), где одна используется для ориентации (поворота головы, туловища и самих глаз); во-вторых, — через таламус, где осуществляется еще одна ее предварительная обработка, в зрительную область коры (в задней части головы). При хорошей освещенности скорость передачи зрительной информации, по-видимому, достигает  $10^9$  бит/с, т.е. выше, чем с телевизионного экрана.

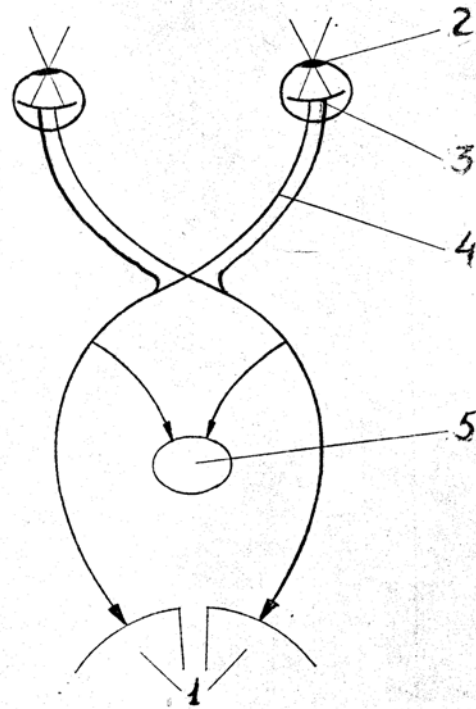


Рис. 2.7. Схема зрительной системы: 1 – зрительная кора; 2 – хрусталик; 3 – сетчатка; 4 – зрительный нерв; 5 – верхнее двухолмие (тектум).

В результате предварительной обработки зрительной информации в сетчатке глаза ганглиозными клетками ее объем уменьшается на два порядка. Эта обработка имеет целью выявить те особенности внешней среды, которые наиболее существенны для формирования поведения и, в частности, оперативной реакции организма на различные изменения внешней среды. Так, например, у лягушки имеются четыре типа ганглиозных клеток, ориентированных соответственно на выявление границы света и тени, движущейся такой границы, темных мест и выпуклого края темного предмета («детектор насекомого»). Все эти признаки наиболее важны для лягушки при ловле насекомых и для укрытия от опасности.

(Лягушка ловит только движущиеся цели определенных размеров, а от больших движущихся объектов убегает в тень). У других животных в соответствии с особенностью их поведения ганглиозные клетки специализированы на выявление других признаков. Например, у кошки, которая, охотясь, долго следит за своей жертвой, готовясь к прыжку, важную роль играют ганглиозные клетки, ориентированные на усиление контрастности изображения.

Ганглиозные клетки разных типов равномерно распределены по всей сетчатке. Аксоны каждого типа этих клеток идут к отдельному слою клеток в зрительной коре мозга, воспроизводя там уже не копию реальной внешней среды в виде поля распределения по сетчатке света и тени, а непрерывно получаемую от ганглиозных клеток пространственно-временную картину соответствующих признаков. У лягушки, например, в соответствии с количеством типов ганглиозных клеток сетчатки в мозгу имеются четыре слоя клеток, которые расположены так, что их точки, соответствующие одному месту сетчатки, расположены друг под другом.

Однако, если у лягушки уже в глазу зрительная информация преобразуется в форму, готовую для выполнения на ее основе конкретных действий, то у более

развитых животных полученная от глаз зрительная информация носит более обширный характер и требует последующей обработки. При этом представление о внешнем мире с позиций возможных реакций организма формируется на более высоком уровне на основе сопоставления зрительной информации с другими видами сенсорной информации. Уже у кошки в мозгу имеются специализированные слои клеток, выявляющие контуры объектов (как границы света и тени) и определяющих значения углов в местах изменения направления контурных линий.

Аналогично устроена слуховая система. Она включает два уха (с улиткой с чувствительными волосковыми клетками во внутреннем ухе), слуховой нерв, который идет к слуховой области коры с промежуточным преобразованием (в нижнем двуххолмии). Одновременно на втором более древнем пути информация от обоих ушей объединяется (в верхней оливе) для определения направления на источник звука.

Итак, мы рассмотрели устройство основных частей системы управления движениями человека, показанной на рис.2.1. С учетом изложенного на рис.2.8 эта система представлена в более подробном виде с выделением отдельных частей центральной нервной системы. На рисунке показаны три основные цепи управления (см. параграф 2.3):

управление мышцами на основе внутренних обратных связей от внутренних рецепторов (толстые штриховые линии);

экстрапирамидный путь управления (толстые сплошные линии);

пирамидный (новый) путь (тонкая сплошная линия).

(В последнем контуре для простоты не показан еще один сенсорный путь к новой коре, идущий через мозжечок и передний мозг.)

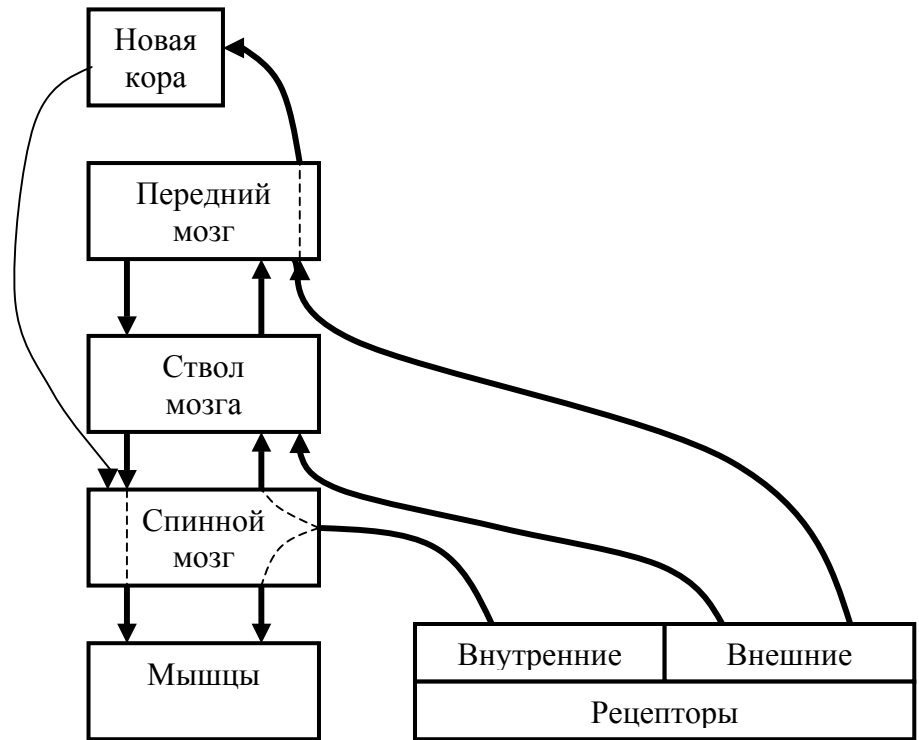


Рис.2.8. Многоконтурная система управления движениями человека.

### 2.3. Динамические уровни управления движением

Система управления движениями тела человека является иерархической, и в ней можно выделить следующие пять уровней управления (рис.2.8):

стратегический уровень (принятие решений о выполнении определенных действий на основе мотиваций);

тактический уровень;

три динамических уровня (исполнение движений путем управления с использованием внешней информации, рефлекторного связанного управления несколькими звеньями тела, рефлекторного управления отдельными звеньями).

Начнем рассмотрение этих уровней снизу. Два нижних динамических уровня управления — это управление по жестким (врожденным) программам, т.е. это уровни рефлекторного управления. Осуществляются они через спинной мозг, но в них участвует и центральная нервная система в виде нижних отделов мозжечка (обеспечение тонуса мышц и позы) и переднего мозга (связанное программное управление).

**Рефлекторное управление отдельным звеном (суставом).** На рис. 2.9 показан контур управления одной мышцей. Ее устройство управления, реализованное в сегменте спинного мозга, которому подчинен сегмент тела, содержащий эту мышцу, состоит из трех частей: слоя  $\alpha$ - и  $\gamma$ -мотонейронов, управляющих мышцей, мотонейронного пула сенсорного слоя, связанного с