

*Макаров А.М.*

*Биотехническая  
робототехника*

*Лекционный курс*

**Содержание**

Введение.....	2
1. Технические системы с искусственным интеллектом.....	5
1.1 Биотехнические системы.....	5
1.2 Искусственный интеллект в технических системах.....	6
1.3 Формирование решений и нечеткие множества.....	12
1.4 Проектирование нечетких алгоритмов управления.....	17
1.5 Синтез нечетких регуляторов управления.....	21
1.6 Выбор функции принадлежности.....	23
1.7 Нечеткий регулятор для управление движением подъемного механизма.....	27
1.8 Нечеткие регуляторы на основе искусственных нейронных сетей.....	29
2. Системы распознавания образов.....	33
2.1 Методы распознавания образов.....	36
2.2 Системы распознавания образов.....	42
3. Биотехнические системы распознавания образов.....	44
3.1 Выделение признаков распознавания.....	45
3.2 Робототехника.....	47
3.3 Механотроника.....	50
4 Типовые конструкции.....	53
4.1 Интеллектуальные модули движения.....	58
4.2 Промышленные и мобильные роботы.....	63
3.7 Медицинские роботы.....	72
Заключение.....	78
5 Компьютерная графика.....	79
Основы анимации.....	84
История развития.....	84
Анимация модели человека.....	92
Заключение.....	95
Литература.....	96

**Введение**

Возможность повсеместного использования компьютеров и микропроцессоров, для организации работ и исследования Природы, активизирует разработку сложных технических систем, выступающих в роли помощника человека. Наряду с возможностью использовать такие системы в решении однообразных рутинных задач, часто рассматривается возможность подключения такого помощника для поддержки творческого процесса. Для области прикладных исследований, где требуется большой объем знаний и квалифицированной поддержки такие системы часто рассматриваются в качестве инструмента. Инструмент реализующий как обычные задачи, неоднократно исполняемые человеком, так задачи связанные с поиском оптимального решения в конкретной области деятельности человека, делает незаменимыми технические системы, наделенные некоторыми способностями к исполнению рабочих процедур. Для медицинской практики обращение к таким системам традиционно связано с представлениями о некотором механическом устройстве, возможно реализованном с учетом современных требований к таким объектам.

Научное направление которое формирует такие представления называется механотроникой. Мехатроника — это область науки и техники, основанная на объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими про-

ектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями. Для мехатроники характерно стремление к полной интеграции механики, электрических машин, силовой электроники, программируемых контроллеров, микропроцессорной техники и программного обеспечения. Такая направленность по созданию сложных конструкций, позволяющих заменить рутинные работы, часто исполняемые человеком, создает предпосылки воспроизведения материальных объектов - роботов. Обладая некоторым подобием внешних форм с фигурой человека и неограниченными возможностями поддерживать коммуникативные акты с человеком, такие сложные технические системы способствуют расширению возможностей человека в различных сферах деятельности.

Системное моделирование:

- процессов, с использованием механических узлов и блоков
- вычислительных процессов, с использованием компьютеров
- электромеханических процессов, с использованием компьютеров
- траекторий движения элементов электромеханической конструкции

Использование детекторов - сенсоров фиксации внешних факторов и траектории передвижения электронно-механических конструкций:

- разработка схем управления
- создание технологий перемещения электромеханической конструкции
- разработка систем удаленного управления
- использование микроконтроллеров для задач управления

Наличие сети Интернет и большого количества периферийных устройств, в том числе и информационных ресурсов, создает известные предпосылки для создания интеллектуальных помощников человека. Эта категория роботов имеет свои специфические особенности. В первую очередь здесь приобретает значение внешнего вида робота, функциональные возможности поддерживать диалог и возможность работы в среде Интернет. Интернет пространство прочно вошло в жизнь современного человека, представляет собой специфический социально-культурный феномен и является метасредой для осуществления коммуникаций, хранения и обработки неограниченного количества информации. Число пользователей Интернета неуклонно растет и на сегодняшний день составляет более 4 млрд. человек во всем мире.

Одной из причин такой удивительной популярности Интернета является, возможно, то, что с психологической точки зрения виртуальное общение намного легче реального. Человек общается в созданном им виртуальном пространстве иногда даже под вымышленным именем, происходит моделирование социального статуса индивида. При погружении в Интернет пространство часть сознания остается в реальной действительности и пространстве, а часть погружается в виртуальное пространство и время. Таким образом, человек находится в переходном пограничном состоянии, которое неустойчиво, неопределенно и несет в себе опасность физиологической и психологической зависимости. Интернет обладает своим пространством и временем, которое связывается с реальным пространством и временем человеческого сознанием.

Постановка вопроса о виртуальной реальности была мотивирована прежде всего распространением информационных технологий и системы Интернет. Так или иначе в скором времени особое компьютерное пространство свяжет всех людей, независимо от их местоположения. В компьютерной реальности каждый сможет задавать свои внешние характеристики, менять свою внешность. Любящие пары, которые познакомятся в компьютерной реальности, могут не подозревать не только о том, какая внешность у партнера в действительности, но и какой у него пол. Современные виртуальные компьютерные системы являются прообразом грядущих виртуальных компьютерных вселенных со своими законами и своей историей.

Виртуальная реальность предполагает чувственно-образное пространство, в котором действует воля человека воплощенная в одном из образов виртуальной реальности. Однако образное воплощение человека в виртуальной реальности есть нечто иное, нежели сам человек. Можно предположить, что с усложнением информационных технологий виртуальный мир все более и более будет обретать качества реального мира. То, что мы сейчас понимаем как виртуальный образ, внутри гипотетически усложненного виртуального мира вполне может быть неотличимым от предметной сущности с точки зрения своей внутренней виртуальной логики.

При усложнении виртуального мира до такой степени, когда внутри него невозможно будет провести грань с миром телесным, теряется критерий виртуальности как мира. Что касается аллегоричности виртуальной реальности, то таковой характер она имеет относительно к вне-виртуальной человеческой личности. Однако, при гипотетическом усложнении виртуальной реальности можно предположить, что будет формироваться и новая виртуальная личность, т.е. личность, основные качества которой будут раскрываться через самосознание и самоотнесенность внутри самой же виртуальной реальности.

Принципиальным отличием материальной реальности от виртуальной является то, что образ является результатом использования множества научных концепции и технологий, формирующих, как правило, зрительный образ некоторого гипотетического организма. В силу этого виртуальную реальность следует понимать как менее совершенную нежели наша телесная действительность.

Современные компьютерные технологии сформировали несколько ярко выраженных субкультур В первую очередь это разработчики и модификаторы компьютерных технологий. У них свой стиль поведения, свой язык, своя система ценностей, своя «философия», претензии на сверх-элитарность. Они заражены идеей мессианизма, убеждены в том, что творят будущее человечества: благодаря высокому социальному статусу сообщество пополняется высококлассными специалистами из многих областей науки, искусства, превращаясь в сплоченную междисциплинарную среду.

В этой среде имеются другие группы квалифицированных пользователей, например, инфоброкеры, свободно и целенаправленно передвигающиеся в виртуальном пространстве в поисках информации. Носителями особой субкультуры является маргинальная «богема» виртуального пространства – «киберпанки». Это тысячи компьютерных маньяков, футурологов, ученых-одиночек, художников, музыкантов и т.д. Для многих из них виртуальное общение – единственный способ контактировать с людьми и получить персональный статус. Киберпанкизм как маргинальное культурное явление обеспечивает существование нового underground.

Виртуальный социальный мир плюралистичен, социальный субъект множественен. Множественная идентификация становится причиной хаотичной «неподлинной коммуникации». Сообщества в Интернете подчас носят театральный, игровой характер. Это создает условия для возникновения множественной идентичности, создания нескольких тел одной и той же личности. Человеку предоставляется возможность репрезентировать себя в сети в виде нескольких образов, поменять пол, возраст, национальность, экспериментировать с собственной идентичностью, конструировать любые гибриды.

Биотехническая робототехника формируются на современных представлениях о необходимости конструирования экспертных интеллектуальных систем, способных в реальном масштабе времени оказывать профессиональную поддержку специалистам в сфере биологических и медицинских исследований. Наличие развитой структуры связи и большого количества терминальных средств коммуникации формирует новые представления о возможности конструирования диагностического заключения или плана терапевтической помощи пациенту. Наличие средств связи позволяет обратиться с некоторому виртуальному помощнику - эксперту, обладающему, скажем, «техническим уровнем интеллекта», который в лаконичной форме способен обсудить с человеком суть проблемы. Наличие образа такого собеседника и возможность демонстрировать мимические особенности диалога создает предпосылки для адекватного коммуникативного акта, столь важного в медицинской практике.

В лекционном курсе рассматриваются теоретические основы формирования конструкций биотехнических систем, наделенных внешними формами - похожими на человека и техническими возможностями поддержки коммуникативных актов.

## **1. Технические системы с искусственным интеллектом**

### **1.1 Биотехнические системы**

Развитие современного социума неразрывно с прогрессом в сфере деятельности человека, где важное значение уделяется инструментам и средствам, формирующих и поддерживающих как познавательную, так и творческую деятельность. Технические средства производства, рассматриваемые как инструменты преобразования среды обитания, и, как инструменты познания окружающего мира постоянно менялись, на протяжении всей эволюции социума. На первых этапах развития социума часто использовались механические инструменты, способствующие повышению мускульной силы человека. Механизмы и инструменты этой эпохи чрезвычайно сильно влияли на производственные процессы. Индивидуальный труд рассматривался как простое ремесло, где преобладали примитивные инструменты и технологии.

В историческом плане первые средства, посредством которых изменялись условия среды обитания человека, создавались на основе законов механики. В качестве основного тезиса здесь рассматривалась возможность создания благоприятных условий обитания, сохранения и благоустройство жизненного пространства. Наличие знаний законов механики и астрономии формировали определенные философские взгляды на развитие событий в окружающем мире. Расширение основ естествознания, в частности развитие математики и физики, порождало смену концепций, способствовало выделению новых аспектов мышления, которые отчасти отсутствовали в прошлом. Наблюдение за таким процессом исторической смены парадигм восприятия и трактовки происходящих событий естественно для человека. Размышляя и выделяя существенные особенности исторического процесса развития в социуме и познавая законы окружающего мира каждый член социума получал возможность учиться и овладевать новыми технологиями. Выделение определенных характерных событий для конкретной исторической эпохи нетрудно отметить наличие специфических терминов, понятий и определений, которые синтезируются на наборе знаний и профессиональном опыте. Систематизация знаний о происходящих событиях в природе, в том числе и изучаемых посредством созданных человеком инструментов, позволяет не только расширить представления о природных явлениях, но и воспроизвести новые взгляды на такие процессы, которые в целом ряде случаев обладают лишь описанием. Процессы, наделенные описанием, как в терминах речевого высказывания, письменной записи текста или в виде математических выражений, представляют новые данные и знания об окружающем мире.

Рабочие процессы познания окружающего мира и познания наблюдаемых проявлений природы, в современную эпоху, формируются с использованием специального инструментария. В общем понимании взаимодействия человека с окружающей средой выделяется представление о субъекте, находящемся в определенной исторической эпохе, осуществляющем взаимодействие с окружающей средой посредством сложной технической системы, наделенной механизмами работы с внешними объектами и использующей специальные вычислительные процедуры. Такие представления, воспроизводимые на основе прошлого опыта работы человека в среде обитания, некоторым образом способствовали созданию сложной технической системы. Неясные очертания механических способностей и вычислительных ресурсов формировали представления о «помощнике» человека, который способен усилить физические и аналитические возможности биологической системы – человека. С течением времени, благодаря развитию микроэлектроники это понятие трансформировалось и стало сопоставляться с термином «эргатическая система». Под эргатической системой понимается взаимодействие субъекта и объекта труда, а в более развернутом виде – это система «человек - машина - среда - социум - культура- природа».

Выделение составляющих этого понятия на следующих этапах развития социума и их естественно развитие с учетом наличия новых технических возможностей реализации подобных систем, характеризуется термином «биотехнические системы». В этом термине хорошо просматриваются все исторические этапы взаимодействия человека с окружающей средой и, одновременно с этим, проявляются новые акценты, в первую очередь связанные со сближением понятий о сложной системе живого организма и вычислительной системой. В такой системе наглядно и полно отображается взаимная связь живого субстрата и набора технических модулей. Признание возможности конструирования такой системы создает известные предпосылки для построения интеллектуальных систем, роботов и дроидов. Следует признать, что развитие темы о дроидах наиболее оправдано в сфере военной медицины, где наличие технических систем позволяет расширить спектр медицинской помощи.

Наличие возможности конструирования нового инструмента исследования Природы, где органично сочетаются вычислительные мощности искусственно созданной технической системы и разума человека создает предпосылки развития научной мысли во всех проявлениях.

Биотехнические системы, сочетающие возможности использования знаний и опыта человека, а также наделенные вычислительными ресурсами, способствуют развитию разных видов коммуникации: человек – компьютер; компьютер – компьютер; компьютер – человек. Коммуникация, как процедура организации диалога, в наиболее типичном виде реализуется средствами текстового процессора и развитого интерфейса. Человек вступающий в диалог с технической системой формирует суждения, реплики и запросы в формате письменного текста. Обработка таких запросов вычислительными средствами технической системы происходит с использованием информационных технологий, обеспечивающих акт коммуникации. Очевидное многообразие практических задач обработки запросов, требует создания специальных технологических процедур, обсуждение которых проводится в представленном материале.

## **1.2 Искусственный интеллект в технических системах**

Исследования в области искусственного интеллекта (ИИ) развернулись одновременно с началом промышленного использования ЭВМ. Сам термин "искусственный интеллект" впервые появился в конце 60-х гг. Искусственный интеллект (англ. - artificial intelligence) – это искусственные программные системы, созданные человеком на базе ЭВМ и имитирующие решение человеком сложных творческих задач в процессе его жизнедеятельности. По другому аналогичному определению, "искусственный интеллект – это программы для ЭВМ, с помощью которых машина приобретает способность решать нетривиальные задачи и задавать нетривиальные вопросы".

Различают два направления работ, составляющих искусственный интеллект (ИИ). Первое из этих направлений, которое можно условно назвать бионическим, имеет своей целью смоделировать деятельность мозга, его психофизиологические свойства, чтобы попытаться воспроизвести на ЭВМ или с помощью специальных технических устройств искусственный разум (интеллект).

Второе (основное) направление работ в области ИИ, называемое иногда прагматическим, связано с созданием систем автоматического решения сложных (творческих) задач на ЭВМ без учета природы тех процессов, которые происходят в человеческом сознании при решении этих задач. Сравнение при этом осуществляется по эффективности результата, качеству полученных решений. Созданные в рамках этого направления системы ИИ позволяют доказывать математические теоремы, переводить тексты с одного языка на другой, диагностировать болезни, умело играть в шахматы и другие интеллектуальные игры. Новое поколение роботов, наделенных ИИ, обладает такими "интеллектуальными" способностями, как способность обучаться, приспосабливаться к изменениям внешней среды, "осмысленно" имитируя поведение человека.

Несмотря на различия предметной области (т.е. сферы применения) систем ИИ, можно выделить некоторые общие принципы их построения и функционирования. Прежде всего, отметим, что процесс мышления человека обладает рядом характерных особенностей:

1. Существует цель, т.е. тот конечный результат, на который направлены мыслительные процессы человека

2. Человеческий мозг хранит огромное число фактов и правил их использования. Для достижения определенной цели надо только обратиться к нужным фактам и правилам.

3. Принятие решений всегда осуществляется на основе специального механизма упрощения, позволяющего отбрасывать ненужные (малосущественные) факты и правила, не имеющие отношения к решаемой в данный момент задаче, и, наоборот, выделять главные, наиболее значимые факты и правила, нужные для достижения цели.

4. Достигая цели, человек не только приходит к решению поставленной перед ним задачи, но и одновременно приобретает новые знания. Та часть интеллекта, которая позволяет ему делать соответствующие заключения (выводы) на основании правил, отобранных механизмом упрощения, и генерировать новые факты из уже существующих, называется механизмом (или машиной) вывода (inference machine).

Так, типовая схема решения математической задачи часто выглядит следующим образом. Выбираются неизвестные величины, подлежащие определению. На основании анализа условий (ограничений), содержащихся в исходной формулировке задачи, составляется система уравнений, связывающих указанные неизвестные. Далее, применяя какой-либо из стандартных методов решения полученных уравнений, находим искомое решение задачи. Заметим, что, решив один раз конкретную задачу по описанной схеме, мы решим (и гораздо быстрее) другую подобную (и даже более сложную) задачу, отличающуюся значениями исходных данных, числом неизвестных, формой представления условий и т.д.

Поскольку система ИИ принимает решения аналогично тому, как это делает человек, то она должна включать в себя следующие ключевые элементы – цели, факты и данные, правила, механизмы вывода и упрощения.

Все эти компоненты системы ИИ показаны на рис. 1.1



Рис. 1.1. Компоненты системы ИИ

На этом же рисунке выделена база знаний, которая содержит всю располагаемую информацию о внешнем мире (моделях решаемых задач). Условно она может быть разделена на три

части (или области), называемые базой целей, базой правил и базой данных. Первая область содержит информацию о целях, для достижения которых предназначена система ИИ. Вторая область включает в себя сведения, которые отражают закономерности, характерные для решаемого класса задач. Это правила, механизмы упрощения и вывода, которые позволяют не только выводить новые факты, не зафиксированные ранее в базе данных, но и приобретать новые знания в ходе функционирования системы или на этапе ее обучения. В третьей области содержатся в некотором упорядоченном виде качественные данные, необходимые для решения задачи. В силу той особой роли, которую играет база знаний в процессе формирования решений, системы ИИ нередко называют системами, основанными на знаниях (knowledge-based systems).

Взаимодействие системы ИИ с человеком-оператором (пользователем системы) и набором датчиков (сенсоров), поставляющих текущую информацию о состоянии внешней среды, при этом осуществляется с помощью специальных аппаратно-программных средств (интерфейса).

Интерфейс также может выполнять интеллектуальные функции, обеспечивая общение с человеком на естественном языке, восприятие символьной и графической информации, сжатие и предварительную обработку результатов измерений и т.д.

Заметим, что построение универсальной системы ИИ, охватывающей все предметные области, является невозможным, так как это потребует бесконечного числа фактов и правил. Более реальной является задача создания таких систем ИИ, которые предназначены для решения задач в узко очерченной, конкретной проблемной области.

Такие системы, использующие опыт и практические знания экспертов-специалистов в данной предметной области, называются экспертными системами (expert systems). Применение экспертных систем оказывается чрезвычайно эффективным в самых различных областях человеческой деятельности (медицина, геология, электроника, нефтехимия, космические исследования и т.д.). Это объясняется рядом причин:

1) появляется возможность решения ранее не доступных, плохо формализуемых задач с привлечением нового, специально разработанного для этих целей математического аппарата (семантических сетей, фреймов, нечеткой логики и т.д.);

2) создаваемые экспертные системы ориентированы на их эксплуатацию широким кругом специалистов (конечных пользователей), общение с которыми происходит в диалоговом режиме, с использованием понятной им техники рассуждений и терминологии конкретной предметной области;

3) применение экспертной системы позволяет резко повысить эффективность решений, принимаемых рядовыми пользователями, за счет аккумуляции знаний в экспертной системе, в том числе знаний экспертов высшей квалификации.

Суть организации экспертной системы (как человеко-машинной) можно условно показать с помощью представленной на рис. 1.2 структурной схемы. Экспертная система включает базу знаний и подсистемы: общения, объяснения, принятия решений, накопления знаний. Через подсистему общения с экспертной системой связаны: конечный пользователь; эксперт - высококвалифицированный специалист, опыт и знания которого намного превосходят знания и опыт рядового пользователя; инженер по знаниям, знакомый с принципами построения экспертной системы и умеющий работать с экспертами в данной области, владеющий специальными языками описания знаний.

Пользователь обращается к системе за советом по своей конкретной проблеме, сообщая ей имеющиеся в его распоряжении данные и возможные гипотезы (альтернативные варианты решений). Эксперт передает системе свои знания по исследуемой частной проблеме, а также общепринятые факты и правила вывода. Инженер по знаниям действует в данном случае в качестве посредника между экспертом и системой, помогая первому закодировать свои знания и проверяя работу законченной экспертной системы.

Одна из новых сфер применения экспертных систем – задачи управления сложными техническими объектами и процессами. Заметим, что традиционный подход к проектированию систем автоматического управления (САУ) сводится к выбору таких алгоритмов управления объектом (часто в рамках некоторых стандартных, например, ПИ (ПИД) - законов управления), которые обеспечили



бы заданные требования к качеству установившихся и переходных режимов работы в условиях действия возмущений. Математическая модель объекта (процесса) при этом считается известной, что позволяет использовать на стадии синтеза алгоритмов управления (регулятора) хорошо разработанные методы оптимизации.

Требования к качеству процессов управления задаются или в виде желаемых значений показателей качества САУ (порядок астатизма, время регулирования, перерегулирование и др.) или же в виде некоторых функционалов качества, подлежащих оптимизации.

В основе данного подхода лежит убеждение в том, что поведение любого объекта и системы можно достаточно точно описать математически, с помощью количественных зависимостей. Даже в тех случаях, когда речь идет о проектировании адаптивной САУ, математическая модель объекта управления, как правило, записывается в виде системы дифференциальных уравнений, включающих в себя, помимо переменных входа, выхода и состояния объекта, также источники «неопределенностей» (т.е. параметрические, сигнальные или структурные возмущения), удовлетворяющие определенным ограничениям.

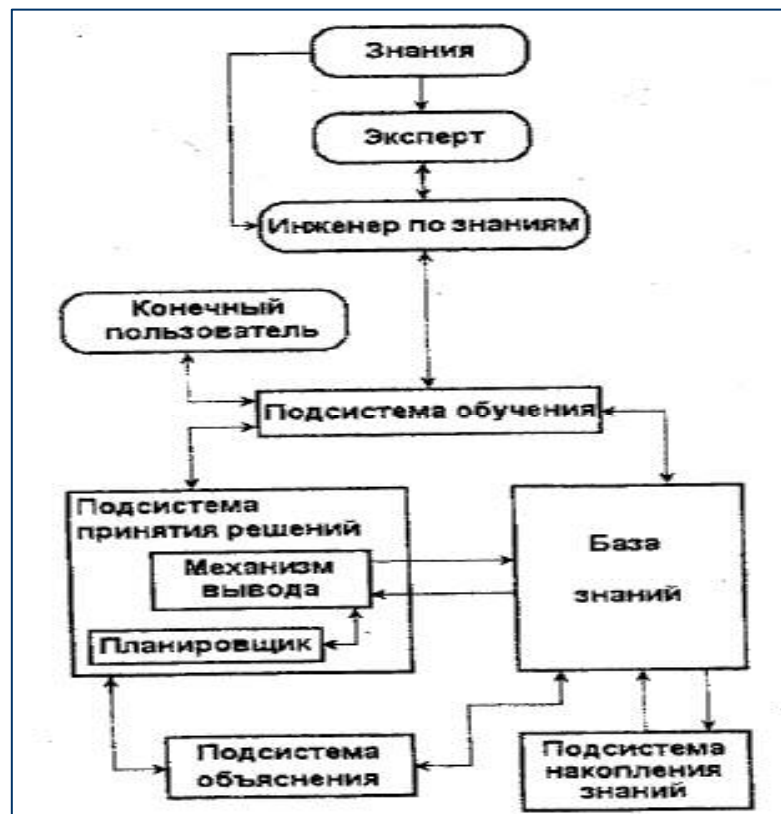


Рис.1.2. Структура экспертной системы

Вместе с тем выбор такой модели нередко производится на основе упрощенных представлений разработчика о функционировании системы, его стремлении подогнать результаты синтеза под имеющиеся модели и инструментальные средства проектирования, получить не "хорошую" систему, а "удобную" процедуру синтеза.

Очевидно, что применение экспертных систем, аккумулирующих знания и опыт экспертов-специалистов в данной предметной области, позволяет существенно повысить качество проектируемых систем управления. Возможны два варианта использования экспертных систем:

1) в качестве "советчика" на этапе проектирования САУ (режим off-line), предлагающего к рассмотрению большое число вариантов (альтернатив) построения регулятора и поясняющего преимущества или недостатки тех или иных решений;

2) включив ее непосредственно в контур управления объектом (процессом) и используя в режиме реального времени (on-line) в качестве "экспертного регулятора" (или "экспертно-управленческой" системы), заменяя, таким образом, традиционные цифровые регуляторы или дополняя их.

Если в первом из этих случаев проблема построения экспертной системы сводится к проблеме "инженерии знаний" (knowledge engineering), т.е. накопления, обобщения знаний экспертов и представления их в наиболее наглядной и удобной для пользователя форме, то цели и функции экспертной системы во втором случае уже совершенно иные.

На "экспертный регулятор" здесь возлагается задача оценки текущего состояния системы на основе информации, поступающей от датчиков, и выбора наиболее подходящей в данный момент стратегии управления, так же, как это делал бы опытный человек-оператор, хорошо представляющий себе особенности управления данным конкретным объектом или процессом. Системы управления 2-го типа, построенные на основе экспертных регуляторов, имитирующих действия человека-оператора в условиях неопределенности характеристик объекта и внешней среды, называются интеллектуальными системами управления (intelligent control systems).

Согласно другому аналогичному определению, интеллектуальной системой управления (ИСУ) является такая, которая обладает способностью понимать, рассуждать и изучать процессы, возмущения и условия функционирования. К изучаемым факторам при этом относятся, главным образом, характеристики процесса (статическое и динамическое поведение, характеристики возмущений, практика эксплуатации оборудования). Желательно, чтобы система сама накапливала эти знания, целенаправленно используя их для улучшения своих качественных характеристик. Чтобы лучше понять принципы функционирования этих систем, рассмотрим возможную структуру ИСУ (рис. 1.3), предназначенной для управления гибкой производственной системой (ГПС).

Гибкая производственная система (flexible manufacturing system) – это такой тип системы, которая объединяет совместно функционирующую в едином производственном процессе группу станков (или рабочих станций), управляемых с помощью ЭВМ и легко переналаживаемых под выпуск широкой номенклатуры изделий. Управление ГПС имеет свои особенности – частая смена заказов на выпуск продукции, большой объем перерабатываемой информации, динамически изменяющаяся внешняя среда.

Интеллектуальная система управления (рис.1.3) обеспечивает принятие рациональных, обоснованных решений по управлению ГПС на этапах планирования, выпуска конечной продукции и контроля за ходом производства.

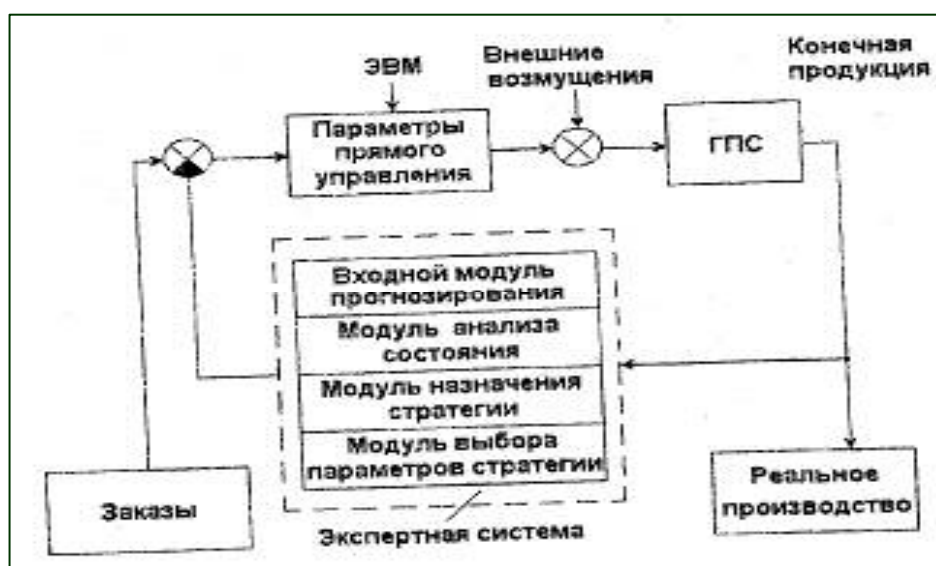


Рис.1.3. Структура интеллектуальной системы управления ГПС

В функции системы управления при этом входят: сохранение нужного состава деталей в системе; выбор последовательности операций по их управлению; распределение работ по станкам; размещение деталей в накопителях в процессе обработки; выбор транспортных средств для перевозки материалов; управление их движением и т.д.

Указанные задачи решаются в режиме прямого цифрового управления (on-line) с помощью специализированной ЭВМ, на которую возлагаются также функции по сбору информации о планируемых заказах, фактическом их исполнении, эффективности функционирования ГПС и по управлению вводом и выводом данных.

Экспертная система играет важную роль в процессе принятия решений, выполняя функции "интеллектуальной" обратной связи. В качестве основных модулей (компонент) в состав экспертной системы входят:

- модуль прогнозирования входных воздействий (МПВ), отвечающих за выполнение прогнозов тех внешних переменных, которые определяют требованиями производства и оказывают непосредственное влияние на график прохождения деталей, использование оборудования и т.д.;
- модуль анализа состояния системы (МАС), обеспечивающий моделирование поведения ГПС на основе входов, предсказанных МПВ, начального состояния системы и фиксированных параметров стратегии (т.е. способа) управления ГПС;
- модуль назначения стратегии (МНС), отвечающий за выбор наиболее пригодных для данной конкретной ситуации альтернатив из имеющегося множества стратегий управления;
- модуль выбора параметров стратегии (МПС), предназначенный для выбора конкретных значений параметров (числовых показателей), определяющих ту или иную стратегию управления.

Взаимодействие перечисленных выше компонент в составе ИСУ показано на рис. 1.4. В процессе работы данной системы используются как: формализованные, математические, методы (временного сглаживания, статистического прогнозирования, распознавания образов, поисковые методы оптимизации и др.), так и специфические, качественные, знания (know-how), полученные путем обработки мнений экспертов и накопленные в базе знаний. Последние включают в себя результаты, касающиеся реакций производственной системы на отдельные комбинации входных воздействий. Для определения частной стратегии управления применяется механизм логического вывода, т.е. набор определенных правил принятия решений с использованием накопленной информации о функционировании ГПС.

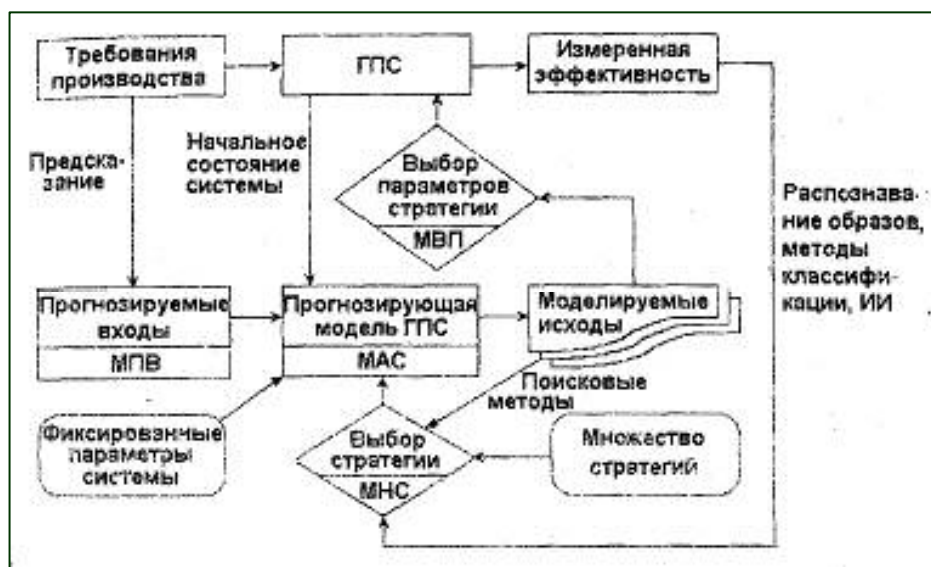


Рис.1.4. Взаимодействие компонент ИСУ

Данная интеллектуальная система управления быстро реагирует на изменения условий производства (очередности и размеров заказанных партий деталей, количества исправных станков,

износа инструмента и т.п.), адаптируясь к указанным возмущениям, изменяя логику своей работы и сокращая в конечном итоге суммарное время изготовления деталей и запасы незавершенного производства. Рассмотренный пример можно распространить и на сферу медицинской практики, где имеет место производство услуг или медицинской техники.

Для создания суждений используется понятие множества. В таком понимании множество является исходным понятием, в рамках которого создается несколько реплик. На языке автоматов и средств вычислительной техники такие процедуры облегчают процесс проектирования сложных систем и кроме того позволяют воспроизводить некоторые элементы мыслительного процесса человека.

### 1.3 Формирование решений и нечеткие множества

Термин "нечеткое множество" (fuzzy set) был впервые введен классической работе Л.А.Заде. Прежде чем дать строгое толкование этого понятия, обратимся к следующему примеру. Допустим, что объектом нашего исследования является множество "взрослых людей", к которому формально можно отнести всех людей, достигших совершеннолетия (18 лет). Если обозначить через переменную  $x$  "возраст человека", а функцию  $\mu(x)$  задать следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 18, \\ 0, & \text{если } x < 18. \end{cases}$$

то множество "взрослых людей"  $A$  может быть задано с помощью выражения

$$A = \{x \mid \mu(x) = 1\}, x \in X,$$

где  $X$  - множество всех возможных значений  $x$ .

Другими словами, множество  $A$  образуют такие "объекты" ("элементы"), для которых указанная выше функция  $\mu(x)$ , называемая функцией принадлежности (membership function), принимает значение 1 (см. верхнюю ветвь графика, выделенного сплошной линией, на рис.2.1.). Напротив, те значения  $x \in X$ , для которых  $\mu(x) = 0$ , не принадлежат множеству  $A$ . В то же время, очевидно, что двузначная логика (типа "да" - "нет"), определяемая функцией принадлежности  $\mu(x): X \rightarrow \{0, 1\}$ , не учитывает возможного разброса мнений различных субъектов относительно границ исследуемого множества  $A$ , влияния чисто биологических факторов, национальных особенностей и т. д.

Поэтому более естественным является задание функции принадлежности в виде некоторой непрерывной зависимости (пунктирная кривая на рис.2.1), определяющей плавный переход

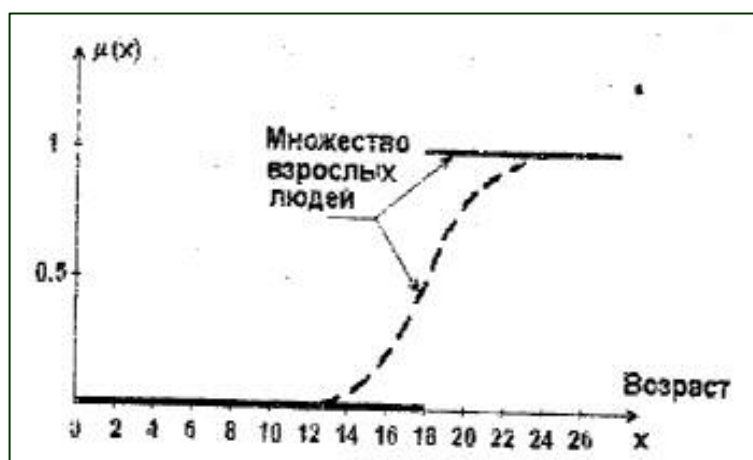


Рис.1.5. Графическое представление множества "взрослых людей"

из одного крайнего состояния в другое (т.е. от принадлежности элементов рассматриваемому множеству до непринадлежности ему).

В данном случае функция принадлежности  $\mu(x): X \rightarrow \{0, 1\}$  ставит в соответствие каждому элементу  $x \in X$  число  $\mu(x)$  из интервала  $[0; 1]$ , описывающее степень принадлежности элемента  $x$  множеству  $A$ . Заданное таким образом множество пар

$$A = \{x, \mu(x) \mid x \in X\}$$

называется нечетким (или размытым) множеством.

Перечислим основные свойства нечетких множеств. Будем называть носителем  $A$  множество тех его элементов  $x$ , для которых  $\mu(x)$  положительна:

$$\text{Носитель}(A) = \{x \in X \mid \mu(x) > 0\}$$

Точка перехода  $A$  – это элемент  $x$  множества  $A$ , для которого  $\mu(x) = 0,5$ .

Срез  $\alpha$  нечеткого множества  $A$  – множество элементов  $x$ , для которых функция принадлежности  $\mu(x)$  принимает значения не меньше заданного числа  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ):

$$A_\alpha = \{x \in X \mid \mu(x) \geq \alpha\}$$

Высота нечеткого множества  $A$  находится как точная верхняя грань (максимум) его функции принадлежности:

$$\text{Высота}(A) = \sup_{x \in X} \mu(x)$$

Если высота нечеткого множества равна 1, то такое множество называется нормализованным. В том случае, когда высота нечеткого множества  $A$  меньше 1 (такое множество называется субнормальным), можно осуществить переход к нормализованному множеству путем деления его функции принадлежности  $\mu(x)$  на высоту  $\sup_{x \in X} \mu(x)$ .

Если носитель нечеткого множества  $A$  состоит из единственной точки  $x$ , то такое множество называется одноточечным (singleton). Данное одноточечное множество обычно записывают в виде

$$A = \mu / x,$$

где  $\mu$  - степень принадлежности  $x$  множеству  $A$ .

Если носитель  $A$  состоит из конечного числа элементов, то для записи такого дискретного множества используется выражение

$$A = \mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_n / x_n, \text{ или } A = \sum_{i=1}^n \mu_i / x_i$$

где числа  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) - степени принадлежности элементов  $x_i$  множеству  $A$ .

Заметим, что знак "плюс" в (2.6) обозначает объединение, а не арифметическое суммирование. Обычное (четкое) дискретное множество при такой форме записи можно представить в виде

$$A = 1 / x_1 + 1 / x_2 + \dots + 1 / x_n \text{ или } A = \sum_{i=1}^n 1 / x_i$$

Возможен и табличный способ задания нечеткого множества  $A$ . Например, таблица

$x_i$	14	16	18	20	22
$\mu_i$	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0

обозначает, что носитель  $A$  состоит из 5 элементов:  $x_1 = 14, x_2 = 16, x_3 = 18, x_4 = 20, x_5 = 22$ , степени принадлежности которых множеству  $A$  равны соответственно: 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 и 1,0.

Если носитель нечеткого множества  $A$  состоит из бесконечного числа точек, например, представляет собой некоторый интервал  $(a, b)$  на числовой оси  $x$ , то функция принадлежности  $\mu(x)$  обычно задается графически или в виде аналитической зависимости.

Рассмотрим пример. Допустим, что для косвенного измерения скорости вращения вала нагруженного электропривода используется выходное напряжение генератора постоянного тока. Известно значение этого напряжения  $x = 5B$ . Кроме того, известно, что ошибка такого измерения составляет  $\pm 1$  В. Тогда переход от четкого значения  $x = 5$  к нечеткому множеству "х равно приблизительно 5" осуществляется следующим образом (рис.1.6).

Функция принадлежности  $\mu(x)$ , приведенная на рис.1.6,в, описывается выражением

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 4 \text{ или } x \geq 6, \\ x - 4, & \text{если } 4 \leq x \leq 5, \\ 6 - x, & \text{если } 5 \leq x \leq 6. \end{cases}$$

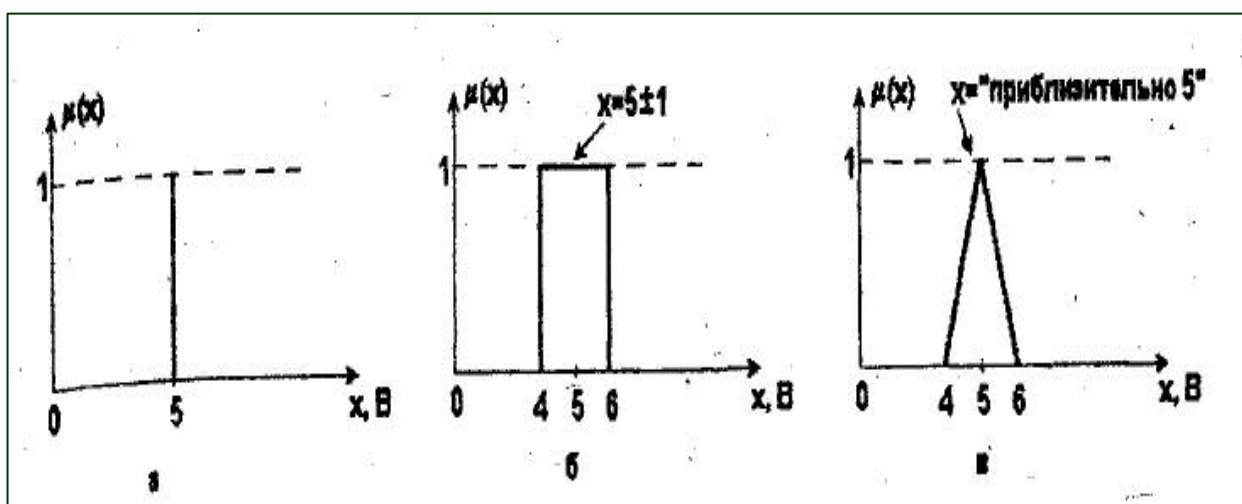


Рис.1.6. Построение функции принадлежности

Представленный на рис.1.6, а - в процесс перехода от четкого (т.е. измеренного) значения  $x = 5$  к его "нечеткой" интерпретации  $x = \text{"приблизительно 5"}$  называется фаззификацией (fuzzyfication).

Вопрос о том, как выбирается (или задается) в каждом конкретном случае функция принадлежности  $\mu(x)$  и какой она имеет смысл, остается в значительной степени спорным и мало изученным.

Наиболее распространенным является мнение, что  $\mu(x)$  может рассматриваться как "субъективная вероятность" или как "коэффициент уверенности" эксперта в том, что элемент  $x$  принадлежит множеству  $A$ .

Одним из ключевых понятий нечеткой логики является понятие лингвистической переменной. Суть данного понятия состоит в том, что конкретные значения числовой переменной  $x$  обычно подвергаются субъективной оценке человеком, причем результат такой оценки выражается на естественном языке.

Так, переменная "Рост (высота) человека" может характеризоваться одним из следующих термов (terms), т.е. сжатых словесных описаний: "маленький", "невысокий", "среднего роста",



"высокий". Другая переменная – "Скорость движения автомобиля" – может быть "малой", "средней", "большой" и т.д. Каждый из приведенных здесь термов может рассматриваться как символ некоторого нечеткого подмножества в составе полного множества значений  $x$ . Переменные, значениями которых являются термы (слова, фразы, предложения), выраженные на естественном языке, называют лингвистическими переменными (linguistic variables).

Задать нечеткое подмножество  $A_i$ , соответствующее определенному  $i$ -му терму (значению) лингвистической переменной, – это значит задать область определения числовой переменной  $x$  и функцию принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A_i$ .

*Пример 1.* Рассмотрим лингвистическую переменную "Яркость" изображения. Будем полагать, что различные значения физической переменной  $x$  яркости (единица измерения кд/м<sup>2</sup>) могут быть охарактеризованы набором из 5 нечетких подмножеств (значений лингвистической переменной): {"Очень темно", "Темно", "Средне", "Светло", "Очень светло"}.

На рис.1.7 показаны функции принадлежности для каждого из этих подмножеств. Допустим, что фактическое значение яркости равно 5,5 кд/м<sup>2</sup>. Тогда, в соответствии с рис.2.3, это значение относится одновременно к двум термам (подмножествам) – "Средне" и "Светло" – со степенями принадлежности  $\mu_{\text{СРЕДНЕ}}(5,5) = 0,75$  и  $\mu_{\text{СВЕТЛО}}(5,5) = 0,25$  соответственно.

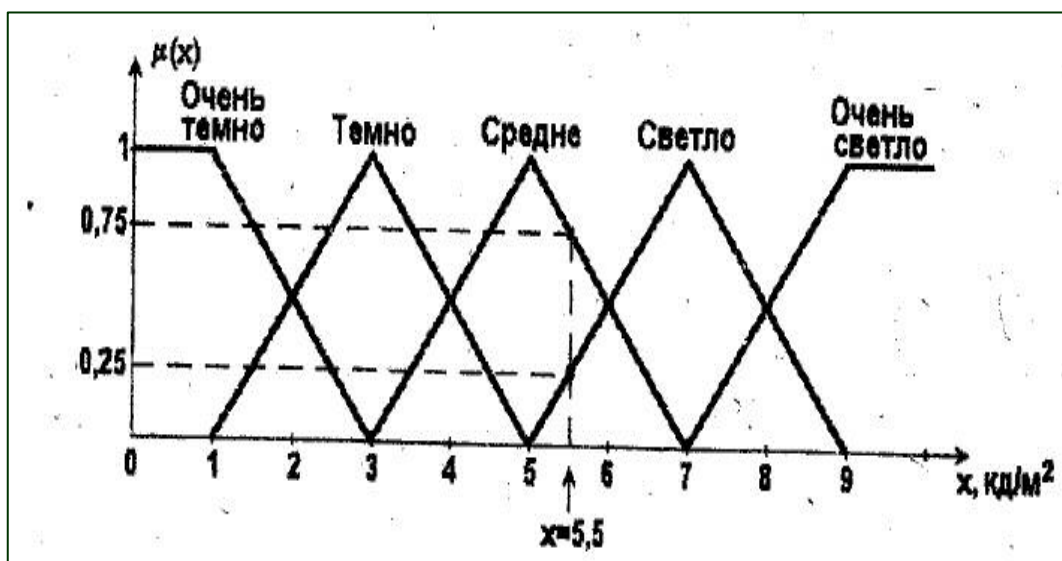


Рис.1.7. Лингвистическая переменная "Яркость"

*Пример 2.* Рассмотрим процедуру фаззификации (перехода к нечеткости) на примере поставляемой с пакетом fuzzy ТЕСН модели контейнерного крана.

Пусть вам, как маститому крановщику, необходимо перегрузить контейнер с баржи на железнодорожную платформу. Вы управляете мощностью двигателя тележки крана, заставляя ее двигаться быстрее или медленнее. От скорости перемещения тележки, в свою очередь, зависит расстояние до цели и амплитуда колебания контейнера на тросе.

Вследствие того, что стратегия управления краном сильно зависит от положения тележки, применение стандартных контроллеров для этой задачи весьма затруднительно. Вместе с тем математическая модель движения груза, состоящая из нескольких дифференциальных уравнений, может быть составлена довольно легко, но для ее решения при различных исходных данных по-

требуется довольно много времени. К тому же исполняемый код программы будет большим и не поворотливым.

Нечеткая система справляется с такой задачей очень быстро – несмотря на то, что вместо сложных дифференциальных уравнений движения груза весь процесс движения описывается терминами естественного языка: «больше», «средне», «немного» и т. п. То есть так, будто вы даете указания своему товарищу, сидящему за рычагами управления.

В процессе фазсификации точные значения входных переменных преобразуются в значения лингвистических переменных посредством применения положений теории нечетких множеств, а именно – при помощи определенных функций принадлежности.

В нечеткой логике значением лингвистической переменной ДИСТАНЦИЯ являются термы ДАЛЕКО, БЛИЗКО и т. д.

Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов. Пусть, например, переменная ДИСТАНЦИЯ может принимать любое значение из диапазона от 0 до 60 м. Каждому значению расстояния из диапазона в 60 метров может быть поставлено в соответствие некоторое число, от нуля до единицы, которое определяет СТЕПЕНЬ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ данного физического значения расстояния (допустим, 10 метров) к тому или иному терму лингвистической переменной ДИСТАНЦИЯ.

Расстоянию в 50 метров можно задать степень принадлежности к терму ДАЛЕКО, равную 0,85, а к терму БЛИЗКО - 0,15. Конкретное определение степени принадлежности возможно только при работе с экспертами.

При обсуждении вопроса о термах лингвистической переменной интересно прикинуть, сколько всего термов в переменной необходимо для достаточно точного представления физической величины.

В настоящее время сложилось мнение, что для большинства приложений достаточно 3 - 7 термов на каждую переменную. Минимальное значение числа термов вполне оправданно. Такое определение содержит два экстремальных значения (минимальное и максимальное) и среднее. Для большинства применений этого вполне достаточно. Что касается максимального количества термов, то оно не ограничено и зависит целиком от приложения и требуемой точности описания системы.

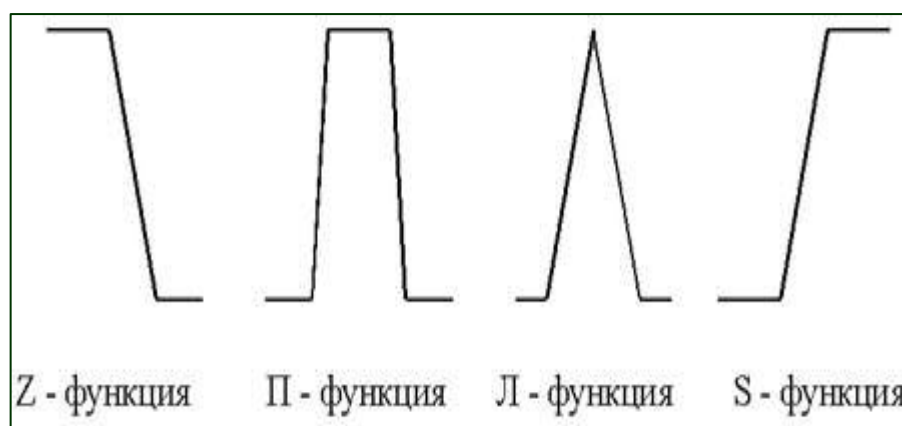


Рисунок 1.8 Типовые функции принадлежности

Число же 7 обусловлено емкостью кратковременной памяти человека, в которой, по современным представлениям, может храниться до семи единиц информации.

Дадим два совета, которые помогут в определении числа термов:

- исходите из стоящей перед вами задачи и необходимой точности описания, помните, что для большинства приложений вполне достаточно трех термов в переменной;



- составляемые нечеткие правила функционирования системы должны быть понятны, вы не должны испытывать существенных трудностей при их разработке; в противном случае, если не хватает словарного запаса в терминах, следует увеличить их число.

Как уже говорилось, принадлежность каждого точного значения к одному из термов лингвистической переменной определяется посредством функции принадлежности. Ее вид может быть абсолютно произвольным.

Стандартные функции принадлежности легко применимы к решению большинства задач. Однако если предстоит решать специфическую задачу, можно выбрать и более подходящую форму функции принадлежности, при этом можно добиться лучших результатов работы системы, чем при использовании функций стандартного вида.

Подведем некоторый итог этапа фазификации и дадим некое подобие алгоритма по формализации задачи в терминах нечеткой логики.

Шаг 1. Для каждого термина взятой лингвистической переменной найти числовое значение или диапазон значений, наилучшим образом характеризующих данный терм. Так как это значение или значения являются «прототипом» нашего термина, то для них выбирается единичное значение функции принадлежности.

Шаг 2. После определения значений с единичной принадлежностью необходимо определить значение параметра с принадлежностью «0» к данному терму. Это значение может быть выбрано как значение с принадлежностью «1» к другому терму из числа определенных ранее.

Шаг 3. После определения экстремальных значений нужно определить промежуточные значения. Для них выбираются П- или Л-функции из числа стандартных функций принадлежности.

Шаг 4. Для значений, соответствующих экстремальным значениям параметра, выбираются S- или Z-функции принадлежности.

#### 1.4 Проектирование нечетких алгоритмов управления

Применение нечеткой логики обеспечивает принципиально новый подход к проектированию систем управления, "прорыв" в новые информационные технологии, гарантирует возможность решения широкого круга проблем, в которых данные, цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными и в силу этого не поддаются точному математическому описанию.

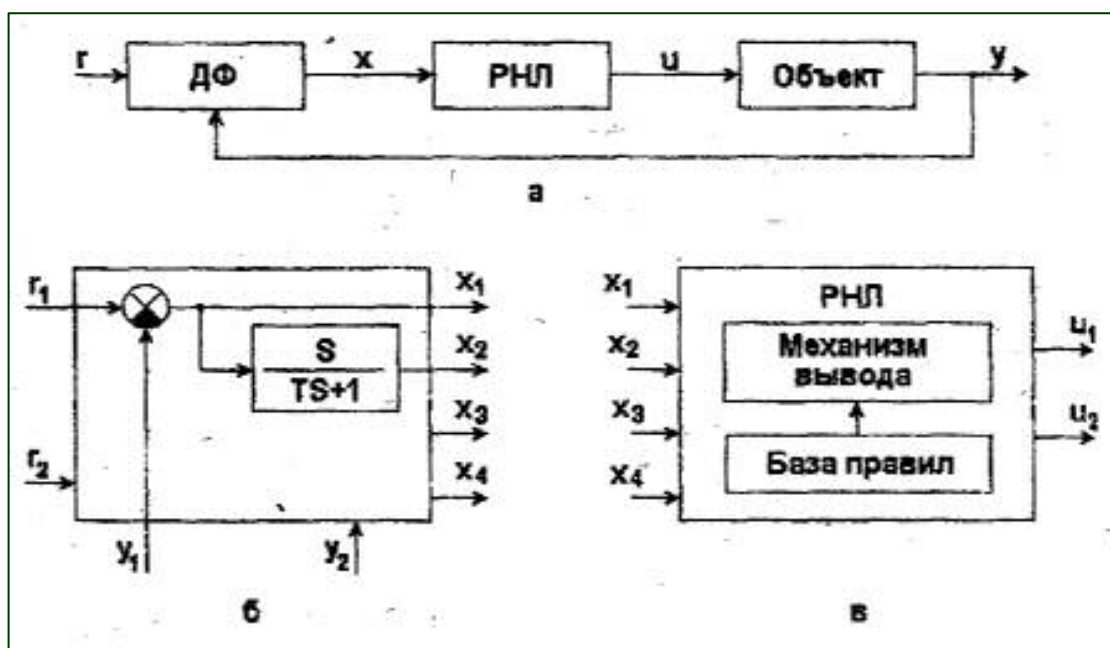


Рис. 1.9. Структурная схема системы нечеткого управления

На рис. 1.9 ДФ - динамический фильтр, выделяющий, помимо сигналов ошибок управления  $x_1=r_1-y_1$  и  $x_3=r_2-y_2$ , производные от этих сигналов  $x_2 = \dot{x}_1$  и  $x_4 = \dot{x}_3$ ;

РНЛ - регулятор на основе нечеткой логики ("нечеткий регулятор", включающий в себя базу знаний (конкретнее - базу правил) и механизм логического вывода;

$$r = (r_1, r_2)^T, X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T, u = (u_1, u_2)^T \text{ и } y = (y_1, y_2)^T$$

соответственно векторы задающих воздействий (уставок), входов и выходов РНЛ, а также выходов объекта управления (т.е. парогенератора);  $t$  - операция транспонирования вектора.

Возможны различные ситуации, в которых могут использоваться нечеткие модели динамических систем:

- когда имеется некоторое лингвистическое описание, которое отражает качественное понимание (представление) процесса и позволяет непосредственно построить множество нечетких логических правил;
- имеются известные уравнения, которые (хотя бы грубо) описывают поведение управляемого процесса, но параметры этих уравнений не могут быть точно идентифицированы;
- известные уравнения, описывающие процесс, являются слишком сложными, но они могут быть интерпретированы нечетким образом для построения лингвистической модели;
- с помощью входных/выходных данных оцениваются нечеткие логические правила поведения системы.

Первые результаты практического применения алгоритмов нечеткой логики к управлению реальными техническими объектами были предложены в 1974 г. Под нечетким управлением (Fuzzy Control) в данном, случае понимается стратегия управления, основанная на эмпирически приобретенных знаниях относительно функционирования объекта (процесса), представленных в лингвистической форме в виде некоторой совокупности правил.

В качестве входов и выходов РНЛ выступают:

$x_1 = P_E$  - отклонение давления в паровом котле ( $y_1$ ) по отношению к и требуемому (номинальному) значению ( $r_1$ );

$x_2 = C_{PE}$  - скорость изменения  $PE$ ;

$x_3 = S_E$  - отклонение скорости изменения давления ( $y_2$ ) по отношению к его заданному значению ( $r_2$ );

$x_4 = C_{SE}$  - скорость изменения  $SE$ ;

$u_1 = H_c$  – изменение степени подогрева пара;

$u_2 = T_c$  - изменение положения дросселя.

Будем рассматривать эти величины как лингвистические переменные, каждая из которых может принимать одно из следующих значений из множества

$$L = \{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}.$$

Здесь 1-я буква в обозначении указывает знак числовой переменной и соответствует английскому слову Negative ("отрицательное") или Positive ("положительное"), 2-я буква говорит об абсолютном значении переменной: Big ("большое"), Middle ("среднее"), Small ("малое") или O ("близкое к нулю"). Например, символ NS означает "отрицательное малое".

В процессе работы ИСУ в каждый момент времени используется один из двух нечетких алгоритмов: по первому из них осуществляется регулирование давления в котле путем изменения подогрева пара  $H_c$ , по второму поддерживается требуемая скорость изменения давления с помощью изменения положения регулирующего дросселя  $T_c$ . Каждый из алгоритмов состоит из ряда правил – высказываний, записанных на естественном языке, типа:

"Если отклонение давления в котле большое, отрицательного знака и если это отклонение не убывает с большой или средней по величине скоростью, то степень подогрева пара необходимо сильно увеличить".

Или: "Если скорость изменения давления чуть ниже нормы и в то же время эта скорость резко растет, то следует изменить положение дросселя на положительную, достаточно малую, величину".

Используя введенные выше обозначения, можно переписать эти правила в следующем виде:

"ЕСЛИ (PE=NB И CPE=NE (NB ИЛИ NM), ТО HC=PB";

"ЕСЛИ (SE=NO И CSE=PB), ТО TC=PS".

Реализация предложенных алгоритмов нечеткого управления при этом принципиально отличается от классических ("жестких") алгоритмов, построенных на основе концепции обратной связи (Feed-back Control) и, по существу, просто воспроизводящих некоторую заданную функциональную зависимость или дифференциальное уравнение.

Нечеткий регулятор берет на себя те функции, которые обычно выполняются опытным и умелым обслуживающим персоналом. Эти функции связаны с качественной оценкой поведения системы, анализом текущей меняющейся ситуации и выбором наиболее подходящего для данной ситуации способа управления объектом. Данная концепция управления получила название опережающего (или упреждающего) управления (Feed-Forward Control).

Используя образное сравнение, можно сказать, что примерно так действует опытный теннисист, каждый раз варьируя свой удар, чтобы мяч летел по определенной, выбранной им траектории, тогда как теннисный автомат работает по жестко заданной программе, подавая мяч всегда в одну и ту же точку, по одной и той же траектории.

Блок - схема нечеткого регулятора в общем случае принимает вид, изображенный на рис.1.10. Как видно из данной схемы, формирование управляющих воздействий  $u_1, u_2, \dots, u_m$  включает в себя следующие этапы:

- получение отклонений управляемых координат и скоростей их изменения –  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;
- "фаззификация" этих данных, т.е. преобразование полученных значений к нечеткому виду, в форме лингвистических переменных;
- определение нечетких (качественных) значений выходных переменных  $u_1, u_2, \dots, u_m$  (в виде функций их принадлежности соответствующим нечетким подмножествам) на основе заранее формулированных правил логического вывода, записанных в базе правил;
- "дефаззификация", т.е. вычисление реальных числовых значений выходов  $u_1, u_2, \dots, u_m$ , используемых для управления объектом.



Рис. 1.10. Блок-схема нечеткого регулятора

Помимо представленного на рис. 1.10 варианта "чистого" использования нечеткого управления, существуют и другие варианты построения ИСУ с нечеткими регуляторами. Так, в классической теории регулирования широкое распространение получило использование ПИД - регулятора, выходной сигнал которого вычисляется по формуле

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.1)$$

где параметры  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  характеризуют удельный вес соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей и, должны выбираться исходя из заданных показателей качества регулирования (время регулирования, перерегулирование, затухание переходных процессов).

Возможное использование нечеткого регулятора (НР) для автоматической настройки (адаптации) указанных параметров ПИД - регулятора показано на рис. 1.11 а. Другие варианты применения НР – формирование уставок обычных регуляторов (рис. 3.3,6); подключение параллельно ПИД - регулятору (рис. 1.11, в); управление с предварительной оценкой характеристик сигналов (ОХС), получаемых с датчиков, на основе интерпретации их значимости, выделения обобщенных показателей качества и т. п. с последующей обработкой с помощью алгоритмов нечеткой логики (рис. 1.11,г).

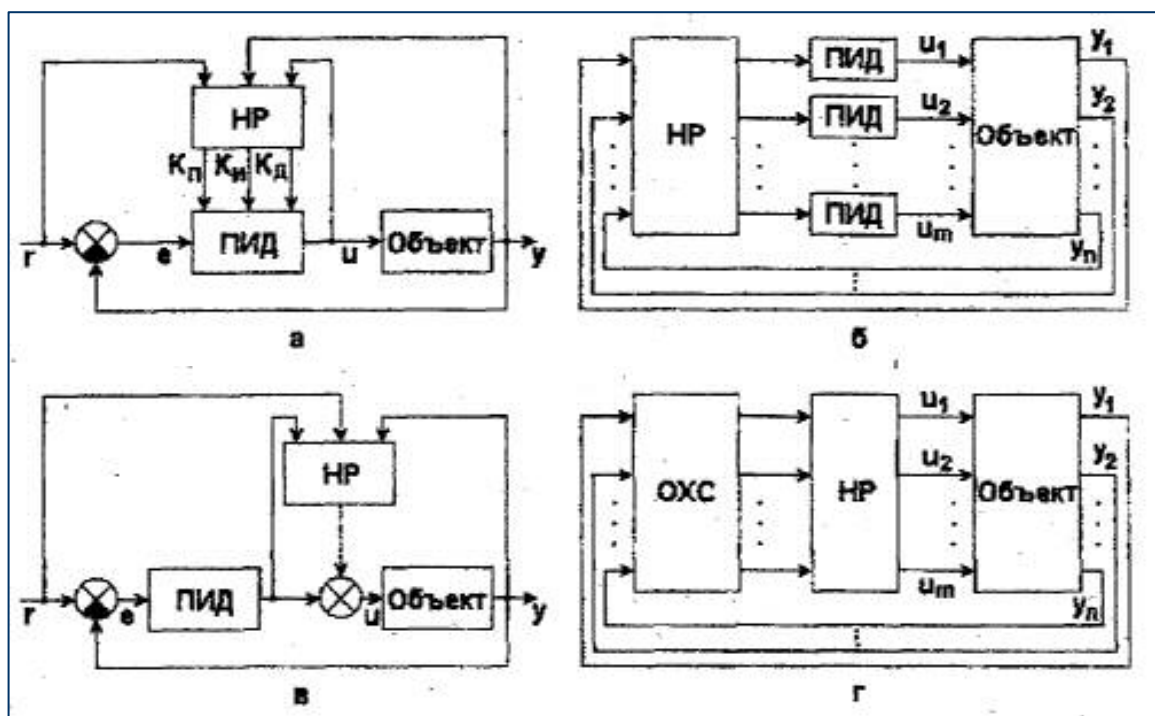


Рис. 1. 11. Структуры ИСУ с нечеткими регуляторами

В качестве предпосылок к применению нечетких регуляторов обычно называются:

- большое число входных параметров, подлежащих анализу (оценке);
- большое число управляющих воздействий (многомерность);
- сильные возмущения;
- нелинейности;
- неточности математических моделей программы регулирования;
- возможность использования технических знаний "know - how".

Подводя итог сказанному, отметим еще раз те области применения, в которых использование нечетких регуляторов оказывается более эффективным по сравнению с традиционными алгоритмами управления. Это:

1) приложения, которые пока были не связаны с автоматизацией, требующие применения "know - how", например, пивоварение (где можно воспользоваться знаниями экспертов с целью повыше-

ния качества продукции), подъемные краны (для повышения производительности рабочего персонала) и т. п.;

2) приложения, в которых математические методы не работоспособны. Это очень сложные процессы, не поддающиеся математическому описанию, для управления которыми можно использовать, наряду с эмпирическими знаниями, также полученную измерительную информацию (например, о ходе химических процессов);

3) приложения, в которых стандартные регуляторы достаточно хорошо работают; однако управление на основе нечеткой логики предлагает в данном случае альтернативный способ решения задач регулирования, возможность работы с лингвистическими переменными, более широкие возможности для оптимизации.

### 1.5 Синтез нечетких регуляторов управления

Обобщенная процедура синтеза нечетких алгоритмов управления может быть сформулирована следующим образом:

1. Определяется множество целей, которые ставятся перед системой. (Какие конечные результаты преследует создание системы?)
2. Уточняются множества входных и выходных переменных регулятора. (какие координаты объекта должны наблюдаться и какие управляющие воздействия должны изменяться, для того чтобы достичь поставленных целей?)
3. Перечисляются возможные ситуации в работе системы. (как должны выбираться лингвистические переменные и какие значения (терм они могут принимать?)
4. Формируется база правил. (Какой набор правил отражает желаемые изменения состояния системы?)
5. Производится выбор метода фаззификации.
6. Конкретизируются механизм вывода и методы дефаззификации. (по каким зависимостям входы нечеткого регулятора должны преобразовываться в его управляющие воздействия?).

Рассмотрим особенности применения данной процедуры на следующем примере, представляющем прежде всего методический интерес. Пусть структурная схема ИСУ соответствует рис. 1.12, т. е. нечеткий регулятор используется для непосредственного (прямого) управления объектом.

Тогда: имеем цель синтеза - создание "хорошего" регулятора, обеспечивающего малое перерегулирование, высокое быстродействие и слабую колебательность (т. е. быстрое затухание) переходных процессов.

Входные величины регулятора - сигнал ошибки  $e = r - u$  и сигнал ее производной  $ce = de(t)/dt$ .

Выход - управляющее воздействие –  $u$ .

Для того чтобы выработать стратегию управления, обратимся к рис. 3.4, на котором показан график переходной функции системы  $u(t)$ , т. е. ее реакции на единичное ступенчатое воздействие  $r(t)$ .

Разобьем график  $u(t)$  на следующие характерные участки:

I - "Начало переходного процесса":

ошибка  $e_k$  велика, скачок скорости ее изменения сек; резко увеличить управляющее воздействие  $\delta u_k - u_{k-1}$ ;

II - "Продолжать движение":

ошибка  $e_k$  велика, но убывает; поддерживать управление  $u_k$  на прежнем уровне или слегка уменьшить;

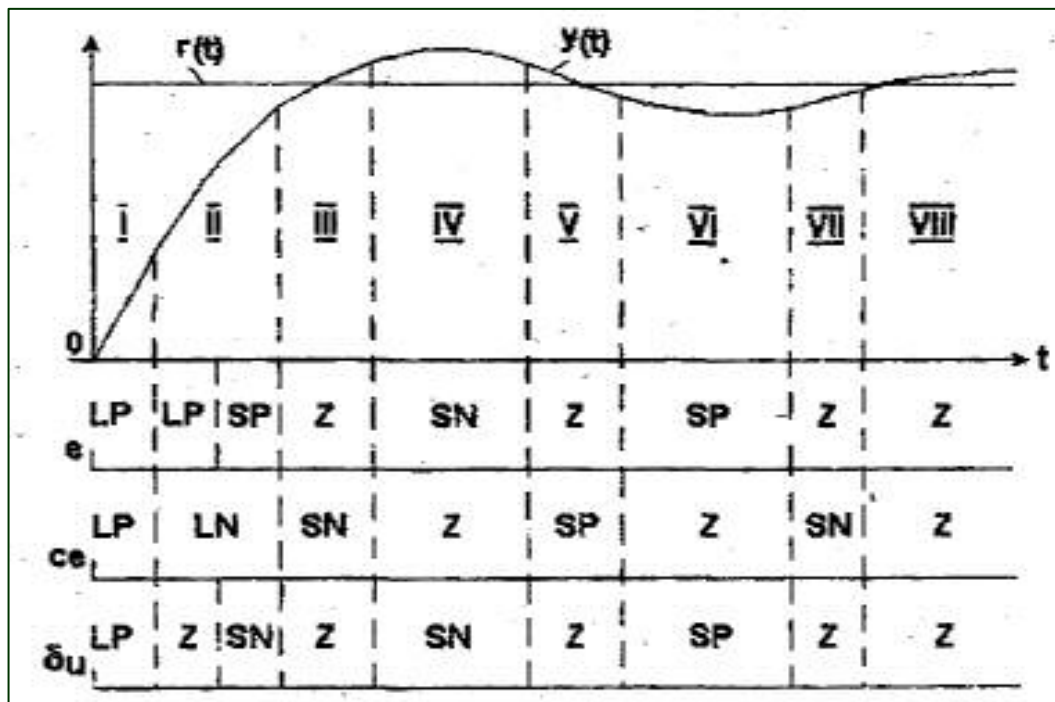


Рис. 1.12. График переходной функции системы

- III, V, VII - "Достигли уровня уставки":
- ошибка  $e_k$  около нуля, скорость ее изменения достаточно мала; сохранить управление  $u_k$ ;
- IV, VI - "Достигли локального максимума (минимума)":
- ошибка  $e_k$  невелика, скорость ее изменения сек около нуля; незначительно уменьшить (или увеличить)  $u_k$ ;
- VIII - "Достигли установившегося состояния":
- ошибка  $e_k$  и скорость ее изменения сек около нуля; сохранить управление  $u_k$

Здесь  $e_k$ ,  $ce_k$ ,  $u_k$  - значения сигнала ошибки, скорости ее изменения и управляющего воздействия в  $k$ -й момент времени  $t_k$  ( $k=0,1,2,\dots$ );  $\delta u_k = u_k - u_{k-1}$ .

4°. Введем следующие обозначения:

LP - "большое положительное" (large positive);

SP - "малое положительное" (small positive);

Z - "около нуля" (zero);

SN - "малое отрицательное" (small negative);

LN - "большое отрицательное" (large negative);

Тогда правила формирования сигнала управления можно записать в следующем виде (см. соответствующие пояснения на рис. 3.4)

ПРАВИЛО I: "ЕСЛИ ( $e_k = LP$  и  $ce_k = LP$ ), ТО  $\delta u_k = LP$  ";

ПРАВИЛО II: "ЕСЛИ ( $e_k = LP$  и  $ce_k = LN$ ), ТО  $\delta u_k = Z$  ";

ИЛИ "ЕСЛИ ( $e_k = SP$  и  $ce_k = LN$ ), ТО  $\delta u_k = SN$  ";

ПРАВИЛО III: "ЕСЛИ ( $e_k = Z$  и  $ce_k = SN$ ), ТО  $\delta u_k = Z$  ";



ПРАВИЛО IV: "ЕСЛИ  $(e_k = SN \text{ и } ce_k = Z)$ , ТО  $\delta u_k = SN$  ",

ПРАВИЛО V: "ЕСЛИ  $(e_k = Z \text{ и } ce_k = SP)$ , ТО  $\delta u_k = Z$  ",

ПРАВИЛО VI: "ЕСЛИ  $(e_k = SP \text{ и } ce_k = Z)$ , ТО  $\delta u_k = SP$  ",

ПРАВИЛО VIII: "ЕСЛИ  $(e_k = Z \text{ и } ce_k = Z)$ , ТО  $\delta u_k = Z$  ".

Для рассматриваемого случая, когда нечеткий регулятор имеет 2 входа и 1 выход, удобно представить данный алгоритм управления с помощью так называемой таблицы решений (decision table) (табл. 1.1).

Данная таблица заполняется следующим образом.

На пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца записывается требуемое значение выходной переменной  $\delta u_k$  соответствующее  $i$ -му значению (терму)  $e_k$  и  $j$ -му значению  $ce_k$ .

Анализ полученной таблицы решений показывает, что предложенный выше набор правил I - VIII не является функционально полным (таблица содержит большое число пустых клеток). Для заполнения недостающих клеток необходимо проанализировать большое число ситуаций управления. Например, возможен "инвертированный" вариант реализации Правила II:

"ЕСЛИ  $(e_k = LN \text{ и } ce_k = LP)$ , ТО  $\delta u_k = Z$  " ИЛИ "ЕСЛИ  $(e_k = SN \text{ и } ce_k = LP)$ , ТО  $\delta u_k = SP$  ",

На этой основе создадим таблицу решений.

$e_k$	LP	Z				LP
	SP	SN		SP		
	Z		Z	Z	Z	
	SN			SN		(SP)
	LN					(Z)
		LN	SN	Z	SP	LP
		$ce_k$				

Очевидно, что увеличение размерности таблицы решений приводит не только к определенным трудностям с точки зрения пополнения (доопределения) системы правил принятия решений, но и связано с возрастанием вычислительных затрат при работе регулятора.

Поэтому на практике рекомендуется принимать число значений (уровней квантования) каждой лингвистической переменной равным 3 - 7.

### 1.6 Выбор функции принадлежности

Как уже отмечалось, выбор функций принадлежности во многом остается предметом интуиции и опыта разработчика.

Существуют стандартные формы задания функций принадлежности (рис. 1.13): треугольная (а), трапециевидальная (б), S - типа, или функция "фильтра" (в), Z - типа (г), колоколообразная (д).

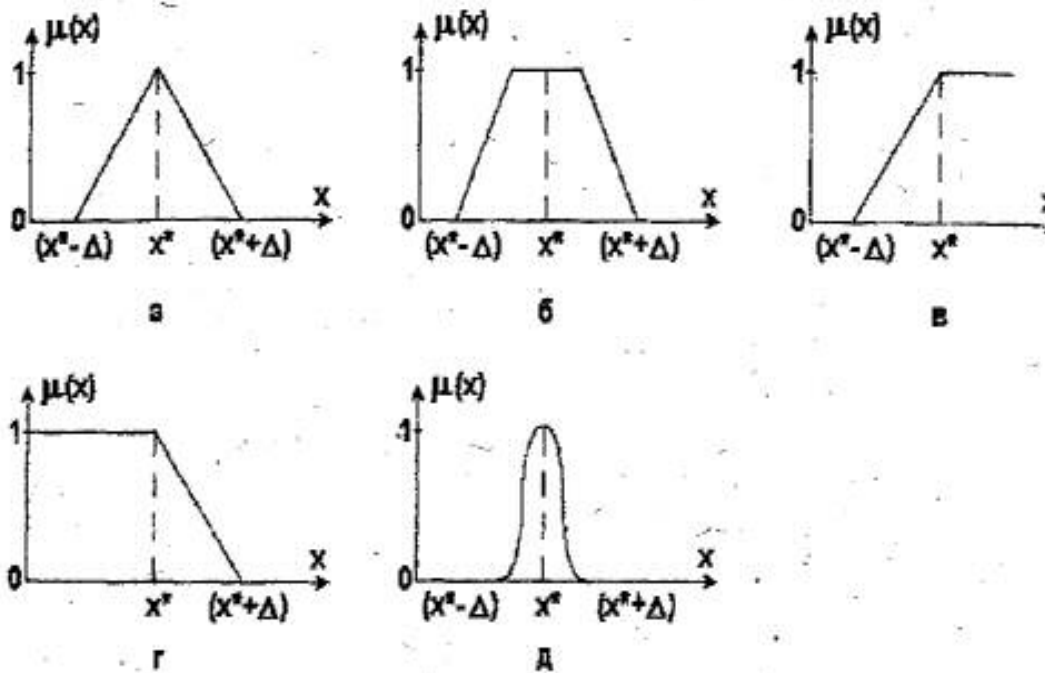


Рис. 1.13. Стандартные формы функций принадлежности

Для того, чтобы выбрать, например, функцию принадлежности, приведенную на рис. 3.5, а, достаточно задать 2 ее параметра – центральную точку  $x^*$  ("прототип" соответствующего нечеткого множества) и ширину  $2\Delta$  перехода от принадлежности этому множеству к непринадлежности ему (т.е., по существу, меру "нечеткости" значения  $x = x^*$ ). И хотя зачастую это бывает непросто сделать (существует даже специальное понятие "сверхнечеткие множества" - "ultrafuzzy sets", когда положение самой функции принадлежности является нечетким и ее границы  $\pm \Delta$  определяются с помощью дополнительно вводимых лингвистических переменных), опытный эксперт так или иначе всегда может выбрать искомые параметры в соответствии со своими представлениями о решаемой задаче.

Для рассматриваемого здесь примера синтеза нечеткого регулятора можно принять следующую форму функций принадлежности .

По оси абсцисс в данном случае откладываются нормализованные значения переменных  $\bar{e}, \bar{ce}, \bar{\delta u}$ , полученные путем деления  $e, ce$  и  $\delta u$  на соответствующие максимальные значения  $|e|_{\max}, |ce|_{\max}, |\delta u|_{\max}$ .

В качестве механизма вывода обычно используется метод Максимума - Минимума или метод Максимума - Произведения. В общем случае первый из этих методов осуществляет переход от условных лингвистических правил вида:

$$\text{„ЕСЛИ } x \in A_i, \text{ ТО (ЕСЛИ } y \in B_i, \text{ ТО } z \in C_i)\text{„} \quad (3.2)$$

к функции принадлежности переменной  $z$   $i$ -му подмножеству)  $C_i$ :



$$\mu_i(z) = \min\{\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(y), \mu_{Ci}(z)\}. \quad (3.3)$$

Если используется набор из  $n$  нечетких правил, то результирующая функция принадлежности выхода  $\mu(z)$  находится путем объединения  $n$  нечетких подмножеств  $C_i$ :

$$\mu(z) = \mu_{\cup C_i}(z) = \max \mu_i(z) \quad (3.4)$$

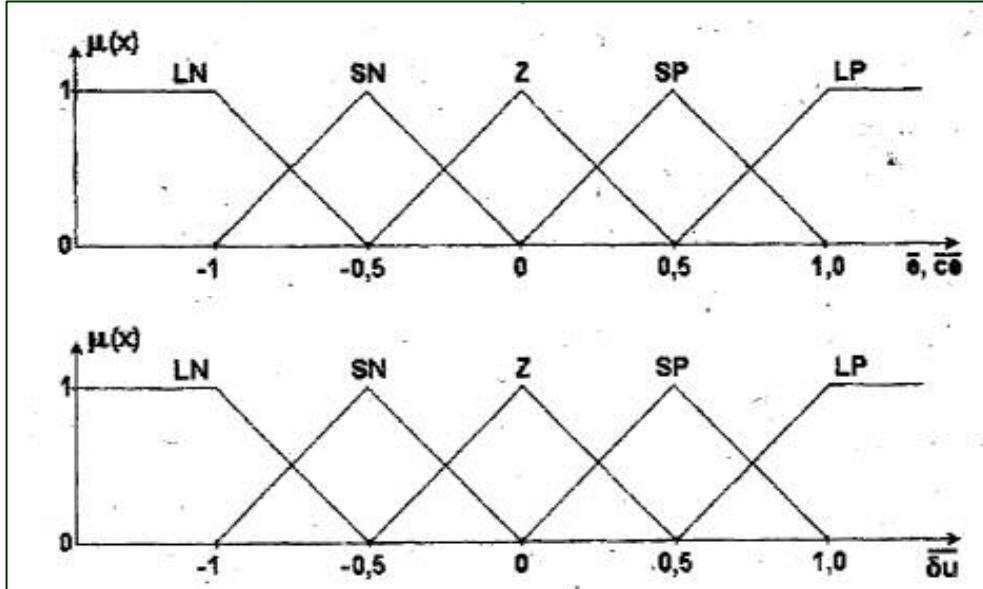


Рис. 1.14 Функции принадлежности лингвистических переменных

По форме полученной функции принадлежности выхода при этом можно оценить качество сформулированных правил управления. Так, функция принадлежности вида 1 (рис. 1.14) указывает на наличие одного доминирующего правила управления. Функция принадлежности 2 указывает, что имеются, по крайней мере, два противоречивых правила. Функция принадлежности 3 указывает, что не имеется подходящих правил для вычисления управления  $\delta u$  (т.е. недостает каких-то правил).

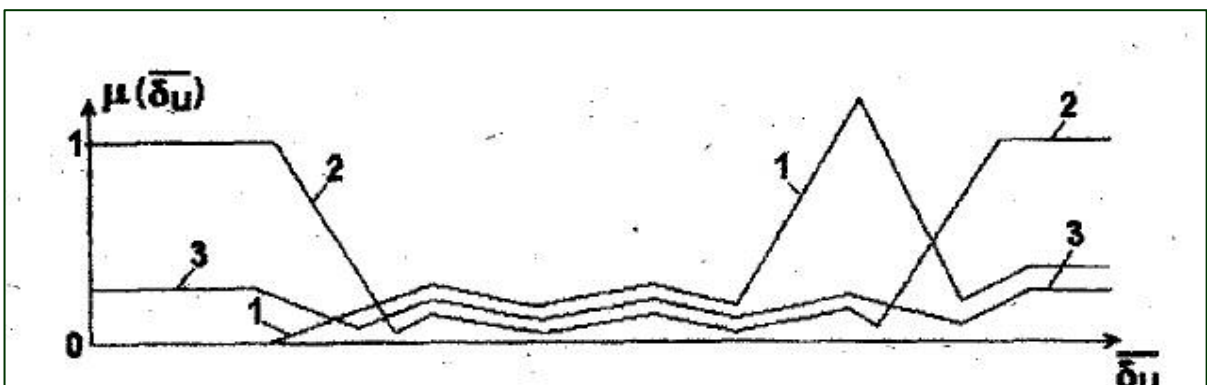


Рис. 1.15. Оценка качества правил управления

Для дефаззификации чаще всего используется метод центра тяжести. Однако, вычисляя положение центра тяжести  $(\delta u)_0$  для полученного графика функции принадлежности  $\mu(\delta u)$  следует учитывать факт пересечения носителей нечетких подмножеств  $\delta u$ . Поэтому каждый раз в процессе дефаззификации приходится пересчитывать значение управляющего воздействия  $(\delta u)_0$ , что приводит к увеличению времени на вычисления.

Процедура дефаззификации существенно упрощается, если значения выходной лингвистической переменной  $\delta u$  заданы с помощью нескольких одноточечных нечетких подмножеств (singletons), например, как это сделано на рис. 1.15, а.

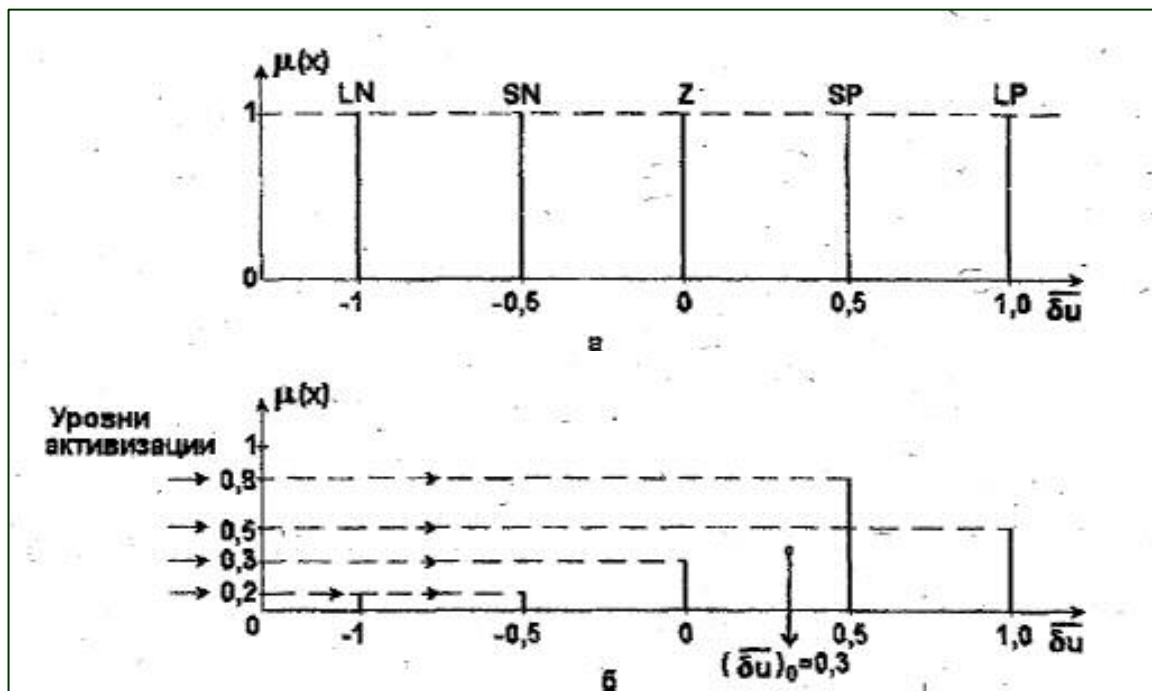


Рис. 1.16. Процедура дефаззификации для одноточечных нечетких подмножеств

Допустим, что полученная на основе механизма вывода функция принадлежности  $\mu(\delta u)$  принимает вид (рис. 1.16, б), где высоты отдельных подмножеств (линий) определяются уровнями активизации соответствующих правил управления (уровнями выполнения условий "ЕСЛИ" этих правил). Тогда вычисление координаты центра тяжести  $(\delta u)_0$  производится по формуле

$$(\delta u)_0 = \frac{\sum_{i=1}^5 \delta u_i^* \mu_{B_i}(\delta u)}{\sum_{i=1}^5 \mu_{B_i}(\delta u)},$$

где  $\mu_{B_i}(\delta u)$  - функции принадлежности одному из одноточечных нечетких подмножеств  $B_i$  (т.е. LN, SN, Z, SP, LP);  $\delta u_i$  - числа носители этих подмножеств. Для рассматриваемого случая на рис. 1.15, б случая имеем

$$\overline{(\delta u)}_0 = \frac{-1 \cdot 0.2 - 0.5 \cdot 0.2 + 0.5 \cdot 0.8 + 1.0 \cdot 0.5}{0.2 + 0.2 + 0.3 + 0.8 + 0.5} = 0.3$$

Эксперименты показывают, что полученные нечеткие системы, даже при сделанных выше упрощениях, являются робастными (т.е. мало чувствительными к различного рода возмущениям) и что эти упрощения не оказывают существенного влияния на качество результатов.

### 1.7 Нечеткий регулятор для управление движением подъемного механизма

При перемещении грузов с помощью кранов часто возникают колебания, амплитуда которых зависит от веса и формы груза, направления и способа подъема, длины груза и, естественно, развиваемых при этом ускорений. Применение классических ПИД - регуляторов в данном случае оказывается возможным лишь тогда, когда имеется возможность перестраивать их параметры непрерывно, в реальном времени в процессе функционирования. Однако адаптивные алгоритмы управления также должны долго отлаживаться и являются дорогостоящими. Применение нечеткого регулирования для этих целей требует лишь использования небольшого количества локальных правил, которые связывают требуемую скорость движения крана, а также угловое отклонение и угловую скорость колебаний груза. При этом затраты на проектирование оказываются существенно меньше по сравнению с традиционными методами адаптивного управления, а точность регулирования сохраняется.

Нечеткий регулятор, разработанный фирмой OMRON - Electronic, в данном случае имеет 3 входные переменные:

$V_{жел}$  - задающее воздействие (уставка) для скорости движения крана;

$\theta$  - угол отклонения груза;

$d\theta/dt$  - угловая скорость колеблющегося груза.

Управляющее воздействие на выходе нечеткого регулятора - сигнал скорости  $V$ , который должен обрабатываться электроприводом крана.

Структурная схема нечеткого регулятора принимает вид (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Структурная схема нечеткого регулятора

Как видно из рисунка., нечеткий регулятор реализует следующие функции:

- ввод (с помощью аналого-цифровых преобразователей) значений угла отклонения груза ( $\theta$ ) и команд управления от крановщика на изменение скорости и направления движения крана ( $V_{жсл.}$ );
- фаззификация указанных значений с использованием лингвистических переменных и заданных функций принадлежности;
- получение (вывод) нечеткого множества значений управляющего воздействия ( $V$ );
- дефаззификация, т.е. получение детерминированного значения  $V$ , подаваемого в качестве сигнала управления на привод двигателя крана.

Функции принадлежности выбираются следующим образом (рис. 1.18).

Для угла  $\theta$ , желаемой скорости движения  $V_{жсл.}$  и сигнала управления скоростью  $V$  задаются по 5 термов (NM, NS, Z, PS, PM); для угловой скорости  $d\theta/dt$  - 3 термина (NS, Z, PS). Заметим, что в тех случаях, когда выбранная скорость  $V_{жсл.}$  не лежит в окрестности нуля, значение лингвистической переменной  $V_{жсл.}$  изменяется с целью переключения соответствующих значений управляющего воздействия  $V$ .

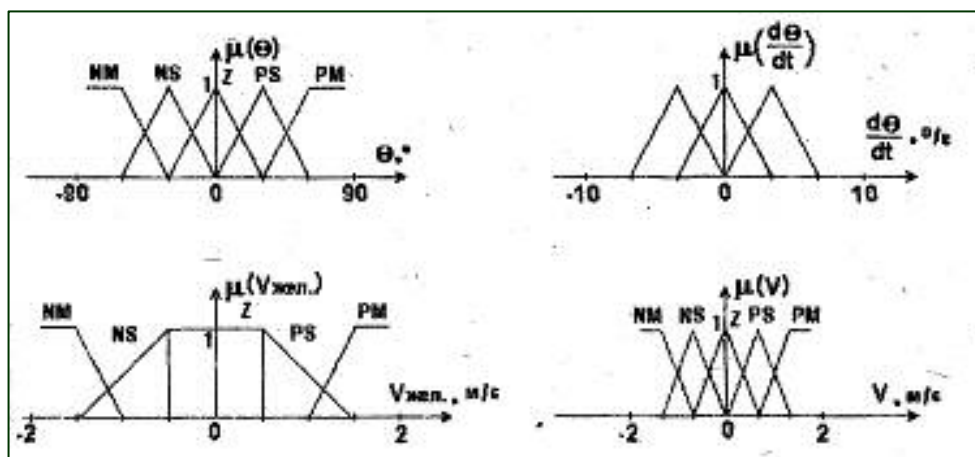


Рис. 1.18. Функции принадлежности лингвистических переменных

Напротив, если  $V_{жсл.} \approx 0$ , то регулятор исходит из того, что кран необходимо притормаживать. Правила, используемые при работе нечеткого регулятора;

- 1°. ЕСЛИ  $V_{жсл.} = PM$ , ТО  $V = PM$ ;
- 2°. ЕСЛИ  $V_{жсл.} = PS$ , ТО  $V = PS$ ;
- 3°. ЕСЛИ  $V_{жсл.} = NS$ , ТО  $V = NS$ ;
- 4°. ЕСЛИ  $V_{жсл.} = NM$ , ТО  $V = NM$ ;
- 5°. ЕСЛИ  $\theta = NM$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = NM$ ;
- 6°. ЕСЛИ  $\theta = NS$  И  $d\theta/dt = NS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = NM$ ;
- 7°. ЕСЛИ  $\theta = NS$  И  $d\theta/dt = Z$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = NS$ ;
- 8°. ЕСЛИ  $\theta = NS$  И  $d\theta/dt = PS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = Z$ ;
- 9°. ЕСЛИ  $\theta = Z$  И  $d\theta/dt = NS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = Z$ ;

- 10° ЕСЛИ  $\theta = Z$  И  $d\theta/dt = Z$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = Z$ ;
- 11° ЕСЛИ  $\theta = Z$  И  $d\theta/dt = PS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = Z$ ;
- 12° ЕСЛИ  $\theta = PS$  И  $d\theta/dt = NS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = Z$ ;
- 13° ЕСЛИ  $\theta = PS$  И  $d\theta/dt = Z$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = PS$ ;
- 14° ЕСЛИ  $\theta = PS$  И  $d\theta/dt = PS$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = PM$ ;
- 15° ЕСЛИ  $\theta = PM$  И  $V_{жсл.} = Z$ , ТО  $V = PM$ .

По существу, здесь реализуются те же правила действий, которые интуитивно использует опытный крановщик в процессе своей работы.

Например, правило 7° можно выразить следующими словами: "ЕСЛИ груз отклонен в противоположную сторону по отношению к направлению его транспортировки, И угловая скорость колебаний примерно равна нулю, И кран подтормаживается, ТО подвинуть кран немного в направлении, противоположном направлению транспортировки".

Подчеркнем, что преимущества использования нечеткого управления; становятся особенно ощутимыми в случаях большой нагрузки оператора, его психологического и физического утомления, затруднений с точки зрения автоматизации процессов традиционными методами. Именно эти обстоятельства и являются определяющими для рассмотренной задачи управления движением крана.

## 1.8 Нечеткие регуляторы на основе искусственных нейронных сетей

Как уже отмечалось, главное преимущество нечетких регуляторов возможность управления сложными объектами с плохо изученной динамикой на основе методов, базирующихся на знаниях. Идея нечеткого управления при этом сводится к моделированию поведения человека–эксперта, способного управлять объектом, не зная его математической модели. Эксперт формулирует свои действия по управлению в виде некоторых лингвистических правил, представляемых затем с помощью аппарата нечеткой логики. Однако сам переход от лингвистических правил к их количественному представлению является недостаточно формализованным и зависит, в частности, от произвольного выбора формы функций принадлежности. Поскольку качество нечеткого регулятора существенно зависит от изменения формы функций принадлежности, то необходима оптимизация (подстройка) параметров этих функций.

Новые возможности для решения этой проблемы открываются в связи с применением искусственных нейронных сетей (artificial neural networks). Объединение нечетких и нейронных сетей позволяет создать качественно новый класс регуляторов, называемых нейро-нечеткими (neuro-fuzzy) или нечетко-нейронными (fuzzy-neuro) и играющих все более заметную роль в интеллектуальном управлении. Эти регуляторы сочетают указанные выше достоинства нечетких алгоритмов с положительными качествами нейронных сетей (универсальность, высокое быстродействие, способность к обучению, устойчивость к отказам).

Поскольку вопросы проектирования нейронных сетей (НС) представляют собой самостоятельный интерес, ограничимся лишь самыми первыми (элементарными) сведениями, дающими представление о данном классе моделей (более подробную информацию по НС можно найти, например, в Первоначально НС предполагалось использовать для моделирования деятельности человеческого мозга. Сегодня они получили широкое применение в технике - для решения задач распознавания образов, прогнозирования, оптимизации, обработки сигналов при наличии больших шумов, управления в реальном времени.

Существует несколько типов НС, которые могут использоваться в системах управления. На рис. 1.18 приведена распространенная структурная схема НС, предложенная еще в 1958 г. нейро-

биологом из Корнеллского университета (США) Ф. Розенблаттом и получившая название многослойного персептрона (multilayer perceptron). (Кстати, и здесь не обошлось без пессимистов: известный математик и кибернетик Марвин Мински из Массачусетского технологического института в 1969 г. написал книгу<sup>1</sup>, где раскритиковал персептроны как вещи, "вплотную примыкающие к бесполезным").

На структурной схеме выделены три слоя, два из которых включают в себя большое число нейронов (neurons), представляющих собой однотипные, простейшие, взаимодействующие друг с другом узлы обработки информации.

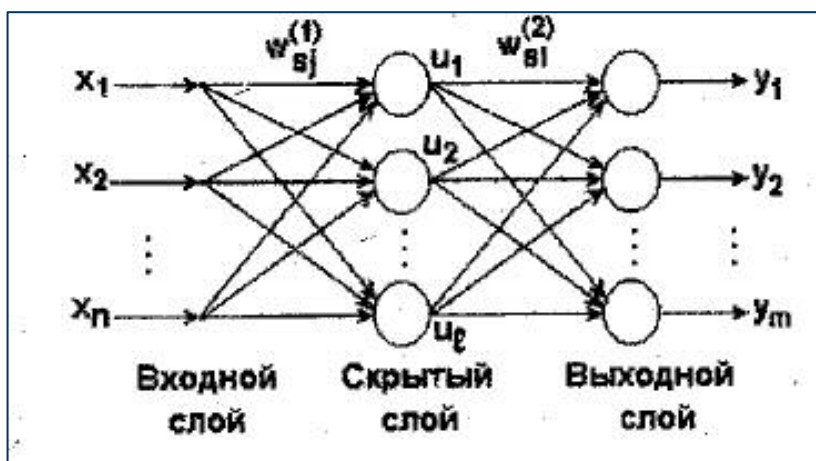


Рисунок 1.19 Структурная схема НС

Второй слой НС, называемый скрытым (или промежуточным) слоем, связан с входными сигналами  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - элементами входного слоя - посредством связей (синапсов) с определенными ве-

$$w_{sj}^{(1)}, (s=1,2,\dots, l; j=1,2,\dots, n).$$

совыми коэффициентами

Модель нейрона скрытого слоя имеет следующий вид (рис. 1.20, а).

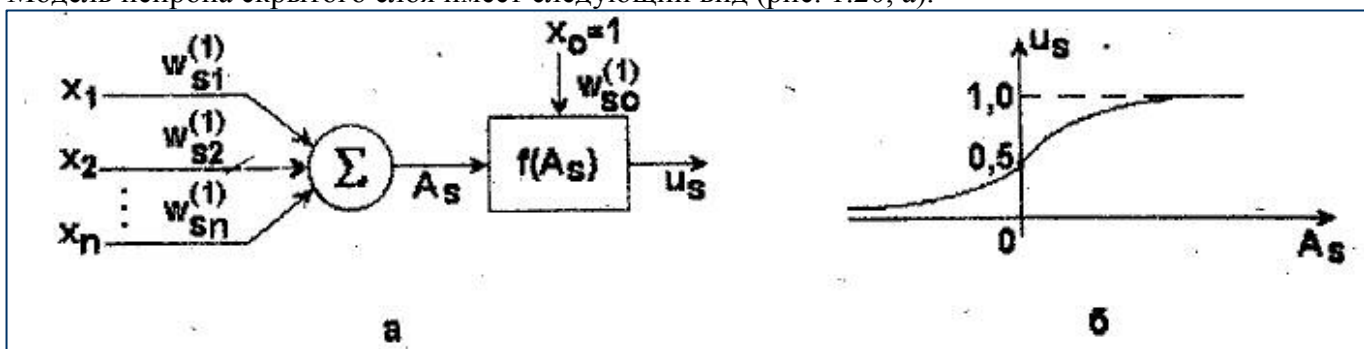


Рисунок 1.20 Модель нейрона

Сигнал  $u_s$  здесь вычисляется с помощью формулы  
 где  $x_j$  ( $j=1,2,\dots, n$ ) - входы НС;  $x_0=1$  - константа (постоянный вход);

$w_s^j$  - настраиваемые коэффициенты (веса);

$A_s$  - взвешенная сумма входных величин НС;  $f(A_s)$  - нелинейная функция, выбираемая в значительной степени произвольно. На рис. 1.20, б приведена так называемая функция активации ней-

рона - "сигмоидная" функция  $f(Ag)$ , обладающая следующими свойствами:  $f(Ag)$  - неотрицательная, монотонно возрастающая функция, принимающая асимптотически значения 1 при  $Ag \rightarrow \infty$  и 0 при  $Ag \rightarrow -\infty$ ;  $f(0)=0,5$ . Пример аналитического выражения для функции  $f(A_s)$ :

$$f(A_s) = \frac{1}{1 + \exp(-A_s)} \quad (1.1)$$

Аналогичной структурой обладают нейроны, расположенные в выходном слое НС. Поведение этих нейронов описывается уравнением

$$y_i = f\left(\sum_{s=0}^l w_{is}^{(2)} u_s\right), \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (1.2)$$

где  $u_0=1$  - константа;  $w_{is}^i$  - весовые коэффициенты (веса соответствующих связей - синапсов);  $l$  и  $m$  - соответственно число нейронов в скрытом и выходном слое. Общее число искусственных нейронов в современных технических НС достигает  $10^4$  (человеческий мозг содержит около  $10^{11}$  нейронов и более чем  $10^{15}$  связей между ними). Основное свойство НС - возможность изменять свои характеристики в желаемом направлении (за счет изменения весовых коэффициентов  $w_{is}^i$ ,  $w_{is}^j$ ) в процессе обучения. Сам процесс обучения протекает следующим образом. На входы НС подаются обучающие данные  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ , для которых известны желаемые (эталонные) реакции НС -  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$ . Далее определяются фактические выходные реакции сети  $y_1, y_2, \dots, y_n$  на эти данные и вектор ошибки  $e = (e_1 \dots e_n)^T$ , компоненты которого представляют собой разности между фактическими и желаемыми значениями выходов НС:

$$e_i = y_i^* - y_i, \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (1.3)$$

Составляется функция, равная сумме квадратов указанных ошибок, и процесс повторяется. В результате для каждого рассматриваемого ( $k$ -го) набора из  $(m+n)$  обучающих данных  $(x_{1k}^*, x_{2k}^*, \dots, x_{nk}^*; y_{1k}^*, y_{2k}^*, \dots, y_{mk}^*)$  значение суммарной квадратичной ошибки

$$E_k = \sum_{i=1}^m [y_{ik}^* - y_{ik}]^2. \quad (1.4)$$

Цель настройки весовых коэффициентов - уменьшение суммарной ошибки  $E$ , для чего обычно используется градиентный метод оптимизации. Согласно этому методу, значения конкретного весового коэффициента  $W$  на  $(k+1)$ -м и  $k$ -м цикле оптимизации связаны между собой следующим соотношением:



$$W_{k+1} = W_k - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W} = W_k - \alpha \cdot \frac{\Delta E_k}{\Delta W_k}, \quad (1.5)$$

где параметр  $\alpha$  влияет на скорость сходимости процесса (обычно рекомендуется  $0,1 < \alpha < 1,0$ );  $\Delta E_k = E_k - E_{k-1}$ ;  $\Delta W_k = W_k - W_{k-1}$ .

Используя алгоритм (1,5) для адаптации коэффициентов на достаточно большом числе обучающих данных, можно добиться малых значений суммарной квадратичной ошибки  $E$ , т.е. хорошего совпадения фактических и эталонных реакций НС.

Существуют различные варианты алгоритмов адаптации весовых коэффициентов НС, из которых наиболее распространенным является метод обратного распространения (Back Propagation). Для реализации изложенных алгоритмов можно использовать, например, параллельные вычисления на транспьютерах, что позволяет выявить достоинства НС в полном объеме. Основные проблемы построения НС, решаемые зачастую эмпирически, - выбор числа слоев и количества нейронов в каждом слое, выбор наиболее эффективного набора обучающих данных, последовательности их предъявления НС и алгоритма адаптации (обучения).

Параллельная структура НС может быть использована в нечетких системах управления (которые по своей природе также могут быть рассмотрены как параллельные) при представлении нечетких подмножеств, заданных их функциями принадлежности, в качестве входных нейронов. На рис. 1.21 показана схема нечеткого регулятора с обучением, полученного на основе метода нечетких ассоциативных отображений (Fuzzy Associated Maps - FAM) и работающего аналогично обучаемой НС.

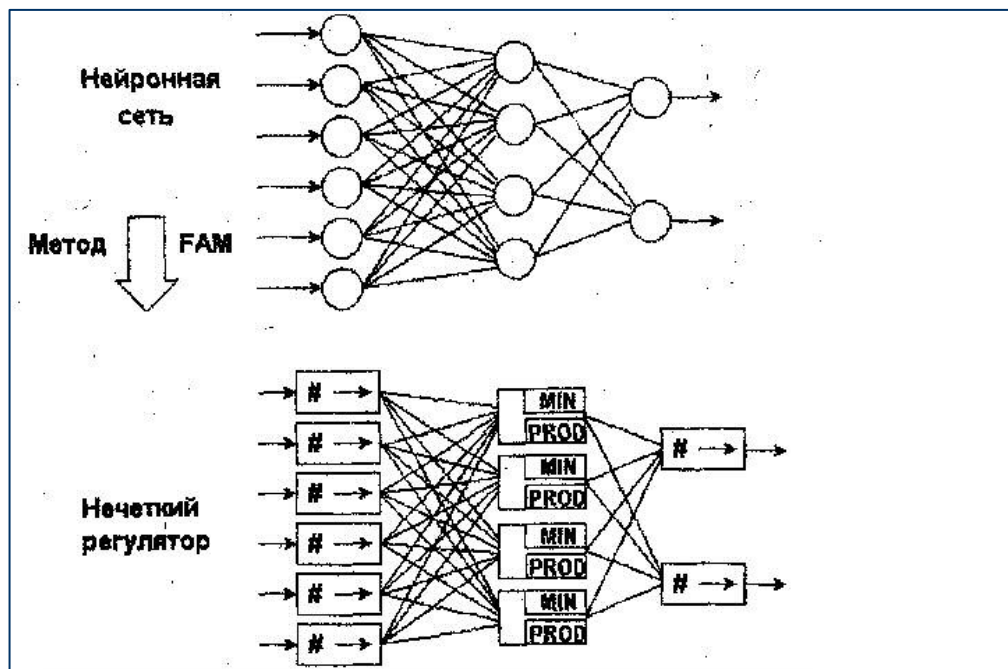


Рис. 1.21 Общая схема построения алгоритма FAM



Символом "#" здесь обозначены "четкие" значения переменных, символ "-^" обозначает соответствующие им нечеткие подмножества (термы). Для выполнения правил вывода используется метод Минимума-Произведения (MIN-PROD). Решение сложной задачи классическими методами практически невозможно, поскольку разработка точных математических моделей потребует годы теоретических исследований, анализа результатов продувок, стендовых и летных испытаний и т.д. Дополнительные сложности связаны с увеличением числа степеней свободы (управление вектором тяги и др.), появлением нерасчетных режимов полета (например, скоростей с числом Маха > 10), ограничениями на управление аэродинамическими поверхностями на неустойчивых режимах и т.п. Использование НС позволяет в данном случае производить идентификацию характеристик системы в реальном времени (с учетом нелинейной динамики самолета) даже при таких изменениях динамики, которые возникают при отказах или повреждениях самолета. Нечеткие регуляторы обеспечивают адаптивное, нелинейное управление самолетом и его силовой установкой в широком диапазоне изменения условий полета, в том числе обеспечение безопасности полета при возникновении критических (аварийных) ситуаций.

## **2. Системы распознавания образов**

Искусственный интеллект (ИИ) как научное направление объединяет исследования по созданию алгоритмов решения с помощью вычислительных машин трудно формализуемых задач, способность решать которые ранее считалась привилегией человеческого разума либо живых организмов.

Трудно формализуемой является задача, которая осознается нами и порою успешно решается с привлечением нашей интуиции, но ее постановку и используемый нами алгоритм ее решения трудно описать в точных терминах, однозначно понимаемых не на интуитивном, а на логическом уровне. В качестве таких задач в рамках проблемы создания ИИ традиционно рассматривались следующие:

- распознавание образов;
- понимание естественного языка;
- принятие решений в интеллектуальных играх (шахматы, шашки, некоторые карточные игры, крестики-нолики и т. п.);
- автоматическое доказательство теорем;
- создание экспертных систем, способных давать квалифицированные советы в различных областях интеллектуальной деятельности (при проектировании, диагностировании заболеваний и т.д.)
- планирование действий робота в недетерминированной среде

В основу работ по ИИ была положена гипотеза о том, что мыслительная деятельность человека может быть описана с помощью алгоритмов и компьютерных программ, то есть может быть формализована.

Вопрос о возможности формализовать мышление человека, т.е. свести его к набору строго определенных и однозначно понимаемых правил и процедур, возник задолго до того как появился сам термин «искусственный интеллект».

Уже Платон (428-348 гг. до н. э.) ставил вопрос о том, что всякое знание и умение должно быть представлено в виде точных определений и правил. Аристотель (384-322 гг. до н. э.) заложил основы формальной логики, разработав силлогистику – систему правил, позволяющих выяснить, когда из некоторой системы утверждений следует определенное заключение, а когда не следует. Однако, он считал, что применение формальных правил возможно не во всех сферах человеческой жизни, т.к. часто приходится обращаться к интуитивным понятиям, которые не могут быть четко и однозначно сформулированы.

Томас Гоббс (1588-1679гг.) в своих работах «Левиафан», «Учение о теле» признавал возможность сведения мышления к формально-логическим и даже арифметическим операциям.

Рене Декарт (1596-1650) считал некорректной постановку вопроса о создании разумных машин. Способность к разумному поведению он связывал с наличием души, которой человек не может снабдить машину. Ему возражал Жюльен Ламерти (1709-1751гг.). В книге «Человек-машина» он утверждает существование только одной субстанции – материи. При этом материю он не считает пассивной. Одна из ее функций – интеллект.

Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646-1716), определив небольшое количество исходных и неопределяемых идей, он попытался установить систему правил, «алгебру», позволяющую сформулировать любое сложное понятие. Его практическим вкладом в решение проблемы ИИ было создание двоичной системы счисления. Это позволило Джорджу Булю (1815-1864гг.) в 1847 г. разработать бинарную алгебру, в которой единица обозначает истину, ноль – ложь, а основными действиями являются операции логические «и», «или», «не». При этом Буль и Лейбниц руководствовались не абстрактными математическими интересами. Их цель была исследовать основные законы разума, на основе которых осуществляется рассуждение.

Чарльз Бебедж (1792-1871гг.) в 1834 году выдвинул проект «аналитической машины», которая была прообразом современного компьютера. Однако проект намного опережал технологические возможности своего времени. Только в 1944 году Х. Айкен построил первую цифровую вычислительную машину «Марк -1».

А. Тьюринг в 1950 году поставил вопрос о том, могут ли машины мыслить. Он предложил критерий оценки интеллектуального поведения машины. Машина согласно такому критерию признается интеллектуальной, если человек, беседуя с ней через телетайп либо по телефону не способен распознать: беседует он с человеком или с машиной. Однако, по современным представлениям такой критерий не является достаточно корректным, поскольку он выделяет лишь одну из многочисленных способностей естественного интеллекта – поддерживать беседу. Тьюрингом были сформулированы многие важные задачи, решение которых способствовало развитию исследований в области ИИ. В частности, им была поставлена задача о реализуемости алгоритма на той или иной вычислительной машине. В этой связи им была предложена абстрактная вычислительная машина, названная впоследствии машиной Тьюринга. Исследование ее возможностей сыграло важную роль в становлении теории алгоритмов, непосредственно примыкающей по совокупности рассматриваемых вопросов к теории ИИ.

Практически используемые системы искусственного интеллекта (СИИ) в большинстве случаев представляют собой модель процесса принятия решений естественным интеллектом. При этом рассматривается задача воспроизведения тех или иных функций естественного интеллекта посредством технических средств. По этой причине проблему ИИ часто называют также проблемой технической имитации интеллекта.

Структуру СИИ можно представить схемой

ситуация  $\rightarrow$   $\sim$ МК  $\rightarrow$  МПР  $\rightarrow$  МО $\sim$   $\rightarrow$  реакция

На ней СИИ представлена состоящей из модуля общения (коммуникации) ( $\sim$  МК), преобразующего внешнюю информацию во внутреннюю, модуля принятия решения (МПР) и модуля общения (МО $\sim$ ), преобразующего внутреннюю информацию во внешнюю информацию либо действия над окружающим СИИ миром.

Описание ситуации и запрос на выработку решения для СИИ может быть представлен на некотором языке, например, на подмножестве естественного языка или в виде сигналов датчиков. Внутреннее представление опирается на термины, используемые в МПР. В качестве выходной реакции может быть фраза на некотором языке, действия либо команды на их исполнение.

Структура МПР может быть представлена схемой

$\rightarrow$  БИ  $\rightarrow$  БВР  $\rightarrow$  БУЗ  $\rightarrow$  ИБД

БИ – блок интерпретации, обеспечивает понимание входной ситуации,

БВР – блок выработки решения, определяет реакцию СИИ на текущую ситуацию, соответствующую целям функционирования системы,

БУЗ – блок усвоения знаний, обеспечивающий понимание и коррекцию знаний об окружающем мире, уточнение целей поведения,

ИБД – интеллектуальный банк данных.

В состав ИБД входят : ИБД, БЦ, БЗ, БД

БЦ – база целей, БЗ – база знаний, БД – база данных.

База целей определяет цели поведения СИИ, обеспечивает реализацию свойства мотивации, побуждения к действию. База знаний содержит сведения, отражающие закономерности, существующие в окружающем мире. Она позволяет выводить из известных фактов новые факты, имеющие место в данном мире, прогнозировать последствия и результаты действий СИИ.

База данных содержит описания известных фактов и количественные данные. Все базы, составляющие ИБД, постоянно обновляются и пополняются в процессе функционирования СИИ в результате действия блока усвоения знаний (БУЗ), черпающего информацию из окружающей среды, так и в результате действия БВР. При этом БУЗ имитирует индуктивное мышление человека, устанавливающего новые закономерности окружающего мира из наблюдений частных фактов, причинно-следственных связей и пополняющего этими закономерностями свою базу знаний. БВР в сочетании с БЗ имитирует дедуктивное мышление человека, устанавливающего новые факты и закономерности на основе ранее накопленных фактов и закономерностей, и переводит эти новые знания в ИБД.

Развитие искусственного интеллекта, равно как и естественного, начинается с создания БД и БЗ, т.е. с накопления фактов и сведений о внешнем мире. Мотивация и направленность его поведения определяется БЦ. При функционировании искусственного интеллекта, также как и естественного интеллекта, преобразование информации происходит в обратном направлении. Вначале инициализируется БЦ, ставятся и уточняются цели, подцели. Затем БВР в соответствии с этими целями, используя БЗ и БД, формирует последовательность решений, направленных на последовательное достижение подцелей и через них достижение стратегической цели.

Наряду с рассмотренной структурой структура СИИ может иметь иерархический характер: центральная СИИ может взаимодействовать с рядом подчиненных СИИ.

В интеллектуальных роботах (ИР) в качестве частных СИИ выступают системы зрения, слуха, осязания, обоняния и т. п. Они обеспечивают задачи распознавания и принятия решений о наличии, расположении, свойствах и т.д. объектов зрительного, акустического и других миров. Эти частные системы содержат в общем случае те же блоки, что и в рассмотренной выше СИИ. Центральная СИИ осуществляет планирование действий робота на основе сообщений, поступающих от частных СИИ. Решения, принимаемые центральной СИИ, подаются на системы управления исполнительными системами робота: механические руки, ноги и т. п.

Заключая обобщенное рассмотрение структуры СИИ можно выделить следующие главные факторы, отличающие СИИ от других автоматических систем.

1. Способность к выводу, генерации конструированию решения, которое в явном и готовом виде не содержится в СИИ.

Наличие знаний об окружающем мире. Они обеспечивают самостоятельность системы в оценке текущей ситуации и выработке решения, направленного на достижение цели, поставленной перед СИИ.

## 2.1 Методы распознавания образов

Различают следующие группы методов распознавания:

- Методы функций близости
- Методы дискриминантных функций
- Статистические методы распознавания.
- Лингвистические методы
- Эвристические методы.

Первые три группы методов ориентированы на анализ признаков, выражаемых числами либо векторами с числовыми компонентами.

Группа лингвистических методов обеспечивает распознавание образов на основе анализа их структуры, описываемой соответствующими структурными признаками и отношениями между ними.

Группа эвристических методов объединяет характерные приемы и логические процедуры, используемые человеком при распознавании образов.

### *Методы функций близости*

Методы данной группы основаны на использовании функций, оценивающих меру близости между распознаваемым образом с вектором  $x^* = (x^*_1, \dots, x^*_n)$ , и эталонными образами различных классов, представленными векторами  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ ,  $i=1, \dots, N$ , где  $i$  – номер класса образов.

Процедура распознавания согласно данному методу состоит в вычислении расстояния между точкой распознаваемого образа и каждой из точек, представляющих эталонный образ, т.е. в вычислении всех значений  $d_i$ ,  $i=1, \dots, N$ . Образ относится к классу, для которого значение  $d_i$  имеет наименьшее значение среди всех  $i=1, \dots, N$ .

Функция, ставящая в соответствие каждой паре векторов  $x_i$ ,  $x^*$  вещественное число как меру их близости, т.е. определяющая расстояние между ними может быть достаточно произвольной. В математике такую функцию называют метрикой пространства. Она должна удовлетворять следующим аксиомам:

- $r(x,y) = r(y,x)$ ;
- $r(x,y) > 0$ , если  $x$  не равен  $y$  и  $r(x,y) = 0$  если  $x=y$ ;
- $r(x,y) \leq r(x,z) + r(z,y)$

Часто оказывается, что разные признаки неодинаково важны при распознавании. С целью учета данного обстоятельства при вычислении функций близости разности координат, соответствующие более важным признакам умножают на большие коэффициенты, а менее важным – на меньшие.

Введение весовых коэффициентов эквивалентно масштабированию осей пространства признаков и, соответственно растяжению либо сжатию пространства в отдельных направлениях.

Указанные деформации пространства признаков преследуют цель такого размещения точек эталонных образов, которое соответствует наиболее надежному распознаванию в условиях значительного разброса образов каждого класса в окрестности точки эталонного образа.

Группы близких друг другу точек образов (скопления образов) в пространстве признаков называют кластерами, а задачу выделения таких групп – задачей кластеризации.

Задачу выявления кластеров относят к задачам распознавания образов без учителя, т.е. к задачам распознавания в условиях отсутствия примера правильного распознавания.

### *Методы дискриминантных функций*

Идея методов данной группы состоит в построении функций, определяющих в пространстве образов границы, разделяющие пространство на области, соответствующие классам образов. Простейшими и наиболее часто используемыми функциями такого рода являются функции, линейно зависящие от значений признаков. Им в пространстве признаков соответствуют разделяющие поверх-

ности в виде гиперплоскостей. В случае двумерного пространства признаков в качестве разделяющей функции выступает прямая линия.

Общий вид линейной решающей функции задается формулой

$$d(x) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n + w_{n+1} = Wx + w_n$$

где  $x$  - вектор образа,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  - вектор весовых коэффициентов.

В случае разбиения на два класса  $X_1$  и  $X_2$  дискриминантная функция  $d(x)$  позволяет осуществить распознавание в соответствии с правилом:

$x$  принадлежит  $X_1$ , если  $d(x) > 0$ ;

$x$  принадлежит  $X_2$ , если  $d(x) < 0$ .

Если  $d(x) = 0$ , то имеет место случай неопределенности.

В случае разбиения на несколько классов вводится несколько функций. При этом каждому классу образов ставится в соответствие определенная комбинация знаков дискриминационных функций.

Например, если введены три дискриминантные функции, то возможен следующий вариант выделения классов образов:

- $x$  принадлежит  $X_1$ , если  $d_1(x) > 0$ ,  $d_2(x) < 0$ ,  $d_3(x) < 0$ ;
- $x$  принадлежит  $X_2$ , если  $d_1(x) < 0$ ,  $d_2(x) > 0$ ,  $d_3(x) < 0$ ;
- $x$  принадлежит  $X_3$ , если  $d_1(x) < 0$ ,  $d_2(x) < 0$ ,  $d_3(x) > 0$ .

При этом считается, что для других комбинаций значений  $d_1(x)$ ,  $d_2(x)$ ,  $d_3(x)$  имеет место случай неопределенности.

Разновидностью метода дискриминантных функций является метод решающих функций. В нем при наличии  $m$  классов предполагается существование  $m$  функций  $d_i(x)$ , называемых решающими, таких, что если  $x$  принадлежит  $X_i$ , то  $d_i(x) > d_j(x)$  для всех  $j$  не равных  $i$ , т.е. решающая функция  $d_i(x)$  имеет максимальное значение среди всех функций  $d_j(x)$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

Иллюстрацией такого метода может служить классификатор, основанный на оценке минимума евклидова расстояния в пространстве признаков между точкой образа и эталоном. Покажем это.

Будем считать, что задано  $m$  классов с эталонами  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Евклидово расстояние между вектором признаков распознаваемого образа  $x$  и вектором эталонного образа определяется формулой  $\|x_i - x\| = [\sum (x_{ij} - x_j)^2]^{1/2}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Вектор  $x$  будет отнесен к классу  $i$ , для которого значение  $\|x_i - x\|$  минимально.

Вместо расстояния можно сравнивать квадрат расстояния, т.е.

$$\|x_i - x\|^2 = (x_i - x)(x_i - x)^T = x x^T - 2x x_i^T + x_i x_i^T$$

Поскольку величина  $x x^T$  одинакова для всех  $i$ , минимум функции  $\|x_i - x\|^2$  будет совпадать с максимумом решающей функции

$$d_i(x) = 2x x_i^T - x_i x_i^T$$

то есть  $x$  принадлежит  $X_i$ , если  $d_i(x) > d_j(x)$  для всех  $j$  не равных  $i$ .

Можно сказать, что машина, классифицирующая по минимуму расстояния, основывается на линейных решающих функциях. Общая структура такой машины, использует решающие функции вида

$$d_i(x) = w_{i1} x_1 + w_{i2} x_2 + \dots + w_{in} x_n + w_{i, n+1}$$

Она может быть наглядно представлена соответствующей структурной схемой.

Для машины, осуществляющей классификацию по минимуму расстояния имеют место равенства:  $w_{ij} = -2x_{ij}$ ,  $w_{i, n+1} = x_i x_i^T$ .

Эквивалентное распознавание методом дискриминантных функций может быть осуществлено, если определить дискриминантные функции как разности  $d_{ij}(x) = d_i(x) - d_j(x)$ .

Достоинством метода дискриминантных функций является простая структура распознающей машины, а также возможность ее реализации преимущественно посредством преимущественно линейных решающих блоков.

Еще одним важным достоинством метода дискриминантных функций является возможность автоматического обучения машины правильному распознаванию по заданной (обучающей) выборке образов.

При этом алгоритм автоматического обучения оказывается весьма простым в сравнении с другими методами распознавания.

В силу указанных причин метод дискриминантных функций завоевал широкую популярность весьма часто используется на практике.

### *Процедуры самообучения распознаванию образов*

Рассмотрим методы построения дискриминантной функции по заданной (обучающей) выборке применительно к задаче о разделении образов на два класса. Если заданы два множества образов, принадлежащих соответственно классам А и В, то решение задачи построения линейной дискриминантной функции ищется в виде вектора весовых коэффициентов  $W=(w_1, w_2, \dots, w_n, w_{n+1})$ , обладающего тем свойством, что для любого образа выполняются условия

$x$  принадлежит классу А, если  $[\sum(w_j x_j - x_j) + w_{n+1}] > 0, j=1, 2, \dots, n.$

$x$  принадлежит классу В, если  $[\sum(w_j x_j - x_j) + w_{n+1}] < 0, j=1, 2, \dots, n.$

Если обучающую выборку составляют  $N$  образов обоих классов, задача сводится к отысканию вектора  $w$ , обеспечивающего справедливость системы неравенств Если обучающую выборку составляют  $N$  образов обоих классов, задача сводится к отысканию вектора  $w$ , обеспечивающего справедливость системы неравенств

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n + w_{n+1} > 0;$$

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n + w_{n+1} < 0;$$

$$\dots$$

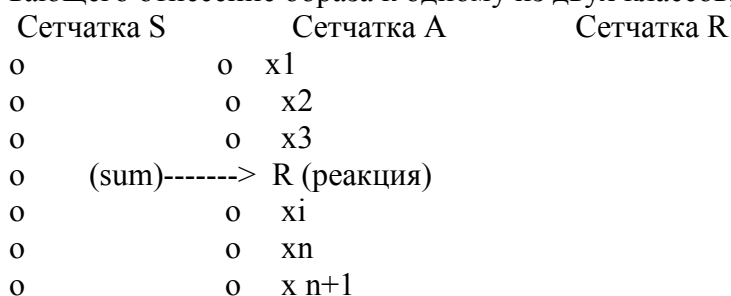
$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n + w_{n+1} > 0;$$

$$\dots$$

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n + w_{n+1} > 0;$$

здесь  $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, x_{in+1})$  - вектор значений признаков образа из обучающей выборки, знак  $>$  соответствует векторам образов  $x$ , принадлежащих классу А, а знак  $<$  - векторам  $x$ , принадлежащих классу В.

Искомый вектор  $w$  существует, если классы А и В разделимы и не существует в противном случае. Значения компонент вектора  $w$  могут быть найдены либо предварительно, на этапе, предшествующем аппаратной реализации СРО, либо непосредственно самой СРО в процессе ее функционирования. Последний из указанных подходов обеспечивает большую гибкость и автономность СРО. Рассмотрим его на примере устройства, называемого перцентроном. изобретенного в 1957 году американским ученым Розенблатом. Схематичное представление перцентрона, обеспечивающего отнесение образа к одному из двух классов, представлено на следующем рисунке.



Устройство состоит из сетчатки сенсорных элементов S, которые случайным образом соединены с ассоциативными элементами сетчатки А. Каждый элемент второй сетчатки воспроизводит выходной сигнал только в том случае, если достаточное число сенсорных элементов, соеди-

ненных с его входом, находятся в возбужденном состоянии. Реакция всей системы  $R$  пропорциональна сумме взятых с определенными весами реакций элементов ассоциативной сетчатки.

Обозначив через  $x_i$  реакцию  $i$ -го ассоциативного элемента и через  $w_i$  - весовой коэффициент реакции  $i$ -го ассоциативного элемента, реакцию системы можно записать как  $R = \sum(w_j x_j)$ ,  $j=1, \dots, n$ . Если  $R > 0$ , то предъявленный системе образ принадлежит классу  $A$ , а если  $R < 0$ , то образ относится к классу  $B$ . Описание этой процедуры классификации соответствует рассмотренным нами раньше принципам классификации, и, очевидно, перцептронная модель распознавания образов представляет собой, за исключением сенсорной сетчатки, реализацию линейной дискриминантной функции. Принятый в перцептроне принцип формирования значений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  соответствует некоторому алгоритму формирования признаков на основе сигналов первичных датчиков.

В общем случае может быть несколько элементов  $R$ , формирующих реакцию перцептрона. В таком случае говорят о присутствии в перцептроне сетчатки  $R$  реагирующих элементов. Схему перцептрона можно распространить на случай, когда число классов более двух, путем увеличения числа элементов сетчатки  $R$  до числа различаемых классов и введение блока определения максимальной реакции в соответствии со схемой, представленной на выше приведенном рисунке. При этом образ причисляется к классу с номером  $i$ , если  $R_i > R_j$ , для всех  $j$ .

Процесс обучения перцептрона состоит в подборе значений весовых коэффициентов  $w_j$  так, чтобы выходной сигнал соответствовал тому классу, которому принадлежит распознаваемый образ.

Рассмотрим алгоритм действия перцептрона на примере распознавания объектов двух классов:  $A$  и  $B$ . Объектам класса  $A$  должно соответствовать значение  $R = +1$ , а классу  $B$  - значение  $R = -1$ . Алгоритм обучения состоит в следующем.

Если очередной образ  $x$  принадлежит классу  $A$ , но  $R < 0$  (имеет место ошибка распознавания), тогда коэффициенты  $w_j$  с индексами, которым соответствуют значения  $x_j > 0$ , увеличивают на некоторую величину  $dw$ , а остальные коэффициенты  $w_j$  уменьшают на  $dw$ . При этом значение реакции  $R$  получает приращение в сторону ее положительных значений, соответствующих правильной классификации.

Если  $x$  принадлежит классу  $B$ , но  $R > 0$  (имеет место ошибка распознавания), то коэффициенты  $w_j$  с индексами, которым соответствуют  $x_j < 0$ , увеличивают на  $dw$ , а остальные коэффициенты  $w_j$  уменьшают на ту же величину. При этом значение реакции  $R$  получает приращение в сторону отрицательных значений, соответствующих правильной классификации.

Алгоритм таким образом вносит изменение в вектор весов  $w$  в том и только в том случае, если образ, предъявляемый на  $k$ -ом шаге обучения, был при выполнении этого шага неправильно классифицирован, и оставляет вектор весов  $w$  без изменений в случае правильной классификации. Доказательство сходимости данного алгоритма представлено в работе [Ту, Гонсалес]. Такое обучение в конечном итоге (при надлежащем выборе  $dw$  и линейной делимости классов образов) приводит к получению вектора  $w$ , обеспечивающего правильную классификацию.

Статистические методы распознавания.

Статистические методы основываются на минимизации вероятности ошибки классификации. Вероятность  $P$  неправильной классификации поступившего на распознавание образа, описываемого вектором признаков  $x$ , определяется формулой

$$P = \sum [p(i) \cdot \text{prob}(D(x) \neq i \mid x \text{ классу } i)]$$

где

- $m$  - число классов,
- $p(i) = \text{prob}(x \text{ принадлежит классу } i)$  - априорная вероятность принадлежности произвольного образа  $x$  к  $i$ -му классу (частота появления образов  $i$ -го класса),

- $D(x)$  - функция, принимающая классификационное решение (вектору признаков  $x$  ставит в соответствие номер класса  $i$  из множества  $\{1, 2, \dots, m\}$ ),
- $\text{prob}(D(x) \text{ не равно } i \mid x \text{ принадлежит классу } i)$  - вероятность события " $D(x)$  не равно  $i$ " при выполнении условия принадлежности  $x$  классу  $i$ , т.е. вероятность вынесения ошибочного решения функцией  $D(x)$  для данного значения  $x$ , принадлежащего  $i$ -му классу.

Можно показать, что вероятность неправильной классификации достигает минимума, если  $D(x)=i$  в том и только в том случае, если  $p(x|i) \cdot p(i) > p(x|j) \cdot p(j)$ , для всех  $i \neq j$ , где  $p(x|i)$  - плотность распределения образов  $i$ -го класса в пространстве признаков.

Согласно приведенному правилу точка  $x$  относится к тому классу, которому соответствует максимальное значение  $p(i) p(x|i)$ , т.е. произведение априорной вероятности (частоты) появления образов  $i$ -го класса и плотности распределения образов  $i$ -го класса в пространстве признаков. Представленное правило классификации называется байесовским, т.к. оно следует из известной в теории вероятности формулы Байеса.

*Пример.* Пусть необходимо осуществить распознавание дискретных сигналов на выходе информационного канала, подверженного воздействию шума. Каждый входной сигнал представляет собой 0 или 1. В результате передачи сигнала на выходе канала появляется величина  $x$ , на которую налагается Гауссовский шум с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma^2$ .

Воспользуемся для синтеза классификатора, осуществляющего распознавание сигналов, байесовским правилом классификации.

В класс №1 объединим сигналы, представляющие единицы, в класс №2 - сигналы, представляющие нули. Пусть заранее известно, что в среднем из каждой 1000 сигналов  $a$  сигналов представляют собой единицы и  $b$  сигналов - нули. Тогда значения априорных вероятностей появления сигналов 1-го и 2-го классов (единиц и нулей), соответственно можно принять равными  $p(1)=a/1000$ ,  $p(2)=b/1000$ .

Полагаем, что шум является гауссовским, т.е. подчиняется нормальному (гауссовскому) закону распределения, то плотность распределения образов первого класса в зависимости от значения  $x$ , или, что тоже самое, вероятность получения на выходе величины  $x$  при подаче на входе сигнала 1 определяется выражением

$$p(x|1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}\right),$$

а плотность распределения в зависимости от значения  $x$  образов второго класса, т.е. вероятность получения на выходе величины  $x$  при подаче на входе сигнала 0 определяется выражением

$$p(x|2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

Применение байесовского решающего правила приводит к выводу, что передан сигнал класса 2, т.е. передан ноль, если

$$p(2) p(x|2) > p(1) p(x|1)$$

или, более конкретно, если

$$b \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) > a \exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}\right),$$

Поделив левую часть неравенства на правую, получим

$$\left(\frac{b}{a}\right) \exp\left(\frac{(1-x)^2 - x^2}{2\sigma^2}\right) > 1,$$

откуда после логарифмирования находим

$$1 - 2x > 2\sigma^2 \ln(a/b)$$

или

$$x < 0.5 - \sigma^2 \ln(a/b)$$



Из полученного неравенства следует, что при  $a=b$ , т.е. при одинаковых априорных вероятностях появления сигналов 0 и 1, образу присваивается значение 0 когда  $x < 0.5$ , а значение 1, когда  $x > 0.5$ .

Если заранее известно, что один из сигналов появляется чаще, а другой реже, т.е. в случае неодинаковых значений  $a$  и  $b$ , порог срабатывания классификатора смещается в ту или другую сторону.

Так при  $a/b=2.71$  (что соответствует в 2.71 раза более частой передаче единиц) и  $b_2=0.1$ , образу присваивается значение 0, если  $x < 0.4$ , и значение 1, если  $x > 0.4$ . Если информация об априорных вероятностях распределения отсутствует, то могут быть использованы статистические методы распознавания, в основу которых положены иные, отличные от байесовского, правила классификации.

Однако, на практике наиболее распространены методы, основанные на правилах Байеса в силу их большей эффективности, а также в связи с тем обстоятельством, что в большинстве задач распознавания образов оказывается возможным задать априорные вероятности появления образов каждого класса.

### *Лингвистические методы распознавания образов.*

Лингвистические методы распознавания образов основываются на анализе описания идеализированного изображения, представленного в виде графа или цепочки символов, являющейся фразой или предложением некоторого языка.

Рассмотрим идеализированные изображения букв, полученные в результате первого этапа лингвистического распознавания, описанного выше. Эти идеализированные изображения можно задать описаниями графов, представленных, например, в виде матриц связей, как это было сделано в рассмотренном выше примере. Это же описание можно представить фразой формального языка (выражением).

*Пример.* Пусть заданы три изображения буквы А, полученные в результате предварительной обработки изображений. Обозначим эти изображения идентификаторами А1, А2 и А3.

Для лингвистического описания представленных образов воспользуемся языком PDL (Picture Description Language). Словарь языка PDL включает следующие символы:

1. Имена простейших изображений (примитивов). Применительно к рассматриваемому случаю примитивы и соответствующие им имена следующие.

### *Изображения в виде линии, направленной:*

вверх и влево (left), на север(north), вверх и вправо (right), на восток(east)).

Имена: L, N, R, E.

2. Символы бинарных операций. {+,\*,-} Их смысл соответствует последовательному соединению примитивов (+), соединению начал и окончаний примитивов (\*), соединению только окончаний примитивов (-).

3. Правую и левую скобки. {(,)} Скобки позволяют определять последовательность выполнения операций в выражении.

Рассматриваемые изображения А1, А2 и А3 описываются на языке PDL соответственно следующими выражениями.

$$T(1)=R+((R-(L+N))*E-L$$

$$T(2)=(R+N)+((N+R)-L)*E-L$$

$$T(3)=(N+R)+(R-L)*E-(L+N)$$

После того как лингвистическое описание изображения построено, необходимо с помощью некоторой распознающей процедуры проанализировать, принадлежит или нет данное изображение к интересующему нас классу (классу букв А), т.е. обладает или нет это изображение некоторой структурой. Для этого прежде всего необходимо описать класс изображений, имеющих интересующую нас структуру.

Очевидно, буква А всегда содержит следующие структурные элементы: левую "ножку", правую "ножку" и головную часть. Назовем эти элементы соответственно STL, STR, TR.

Тогда на языке PDL класс символов  $A$  - SIMB  $A$  описывается выражением

$$\text{SIMB } A = \text{STL} + \text{TR} - \text{STR}$$

Левая "ножка" STL всегда есть цепочка элементов  $R$  и  $N$ , что можно записать так

$$\text{STL} \rightarrow R | N | (\text{STL} + R) | (\text{STL} + N)$$

(STL есть символ  $R$  или  $N$ , или цепочка, полученная добавлением исходной цепочке STL символов  $R$  или  $N$ )

Правая "ножка" STR всегда есть цепочка элементов  $L$  и  $N$ , что можно записать так, т.е.

$$\text{STR} \rightarrow L | N | (\text{STR} + L) | (\text{STR} + N)$$

Головная часть буквы - TR представляет собой замкнутый контур, составленный из элемента  $E$  и цепочек типа STL и STR.

На языке PDL структура TR описывается выражением

$$\text{TR} \rightarrow (\text{STL} - \text{STR}) * E$$

Окончательно получим следующее описание класса букв  $A$ :

$$\text{SIMB } A \rightarrow (\text{STL} + \text{TR} - \text{STR}),$$

$$\text{STL} \rightarrow R | N | (\text{STL} + R) | (\text{STL} + N)$$

$$\text{STR} \rightarrow L | N | (\text{STR} + L) | (\text{STR} + N)$$

$$\text{TR} \rightarrow (\text{STL} - \text{STR}) * E$$

Процедура распознавания в данном случае может быть реализована следующим образом.

1. Выражение, соответствующее образу, сравнивается с эталонной структурой  $\text{STL} + \text{TR} - \text{STR}$ .
2. Каждому элементу структуры STL, TR, STR, если это возможно, т.е. если описание изображения сравнимо с эталоном, ставится в соответствии некоторое подвыражение из выражения  $T(A)$ .

Например,

$$\text{для } A1: \text{STL} = R, \text{STR} = L, \text{TR} = (R - (L + N)) * E$$

$$\text{для } A2: \text{STL} = R + N, \text{STR} = L, \text{TR} = ((N + R) - L) * E$$

$$\text{для } A3: \text{STL} = N + R, \text{STR} = L + N, \text{TR} = (R - L) * E$$

Выражения STL, STR, TR сравниваются с соответствующими им эталонными структурами.

4. Если структура каждого выражения STL, STR, TR соответствует эталонной, делается вывод о принадлежности образа к классу букв  $A$ . Если на каком-либо из этапов 2, 3, 4 обнаруживается несоответствие структуры анализируемого выражения эталону, делается вывод о непринадлежности образа классу SIMB  $A$ . Сопоставление структур выражений может проводиться с помощью алгоритмических языков LISP, PLANER, PROLOG и других подобных им языков искусственного интеллекта.

В рассматриваемом примере все цепочки STL составлены из символов  $N$  и  $R$ , а цепочки STR из символов  $L$  и  $N$ , что соответствует заданной структуре этих цепочек. Структура TR в рассматриваемых образах также соответствует эталонной, т.к. состоит из "разности" цепочек типа STL, STR, "умноженной" на символ  $E$ .

## 2.2 Системы распознавания образов

В качестве модуля общения (связи) в интеллектуальной системе выступает система распознавания образов, преобразующая воздействия внешнего мира во внутренние (машинные) представления о нем. Такими внешними воздействиями могут быть, например, свет, звук, механическое давление и т. п. Соответствующие им сигналы формируются при помощи разнообразных устройств. В простейшем случае, такие сигналы формируются посредством стандартных внешних устройств компьютера: посредством клавиатуры, «мыши», модема, сканера. В других случаях таким внешним устройством может быть видеокамера, микрофон, а также датчики самых разнообразных физических величин. Часто выделение необходимой информации из поступивших сигналов не представляет трудностей. Однако, существуют ситуации, когда «понимание» поступивших сигналов, их правильная интерпретация представляет собой серьезную проблему. В частности,

такая ситуация возникает при необходимости правильно интерпретировать изображения, речевые сообщения.

Далее основное внимание будет уделено проблеме правильной интерпретации компьютером внешних воздействий и выделении полезной информации из соответствующих им сигналов подобно тому, как это происходит в системах зрения, слуха, осязания живых организмов.

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Образ представляет собой описание (отражение) некоторого объекта, представляемое в виде сигналов. Сигналы поступают от сенсоров (датчиков), реагирующих на различные воздействия (свет, звук, давление и т.п.), порождаемые наблюдаемым объектом. Соответственно можно говорить о зрительных, слуховых, тактильных и т.п. сигналах, составляющих образ. Образ может быть представлен сигналами, порожденными воздействиями различной природы.

Например, кошка, в нашем сознании предстает в виде образа, составленного из порождаемой ею совокупности зрительных, слуховых, тактильных сигналов, если мы соответственно ее видим, слышим и можем дотрагиваться до нее.

Конкретная кошка чем-то похожа на всех других кошек. Конкретные яблоко, автомобиль, стол похожи чем-то на все прочие яблоки, автомобили и столы соответственно.

Именно из-за наличия у конкретных объектов некоторых общих признаков мы объединяем их в классы, обозначаемые тем или иным термином (именем): яблоко, автомобиль, стол и т.п.

Если наблюдаемый образ обладает совокупностью признаков, присущих некоторому классу, мы называем этот образ именем этого класса.

Распознавание образов есть отнесение конкретного образа к некоторому классу. Иными словами распознавание образов есть не что иное как их классификация.

#### Примеры:

буква А, написанная конкретным шрифтом или почерком, распознается и относится к классу букв А, куда входят буквы А, написанные любым другим шрифтом или почерком;

звук А, произнесенный конкретным человеком, распознается как звук А и относится к классу звуков А, имеющих различный тембр звучания, длительность, громкость и т.п.; - конкретная книга распознается как книга и относится к классу книг, в который могут входить книги различного формата, толщины, содержания;

- отпечаток пальца или голос конкретного человека узнается и относится к конкретному человеку, как к классу, объединяющему множество возможных отпечатков пальцев или звуков голоса, принадлежащих данному человеку.

В широком смысле распознавание образов включает не только отнесение их к некоторому классу, но и выделение самих классов и тех общих свойств и признаков, которые лежат в основе выделения классов.

Признаки распознавания. Из сказанного выше следует, что распознавание основано на выделении общих свойств у образов, относящихся к данному классу.

Каждое свойство общее для всех образов данного класса называют признаком распознавания.

Например, такими свойствами (признаками) являются

для автомобиля наличие: двигателя, четырех колес, рулевого управления, посадочных мест для водителя и (возможно) пассажиров и т.д.;

для яблока наличие специфической округлой формы, окраски, запаха и т.д.

для воды наличие знакомых нам зрительных, осязательных, вкусовых ощущений, типичных для данного вещества, а также физических и химических свойств.

Признаки, используемых в технических системах распознавания, описываются и представляются на некотором языке, как правило, на языке математики.

Описывая признаки распознавания на том или ином языке, мы тем самым пытаемся формализовать осуществляемую нами процедуру распознавания. Учитывая ограниченные возможности

формализации, процедура распознавания образов, реализованная техническими средствами, неизбежно будет в чем-то отличаться от реализуемой нами.

В некоторых случаях, выделение и формализованное описание признаков достаточных для надежного распознавания объектов заданного класса, оказывается трудноразрешимой, а порою и неразрешимой задачей. Задумайтесь, как нам удастся узнавать знакомых людей по голосу, по старым фотографиям, запечатливших их в те годы, когда мы их не знали? Как мы узнаем на ощупь различные предметы?. Мы умеем это делать (как и многое другое), но не всегда можем объяснить и описать в строгих и точных терминах как мы это делаем, какие признаки при этом мы используем.

Определение признаков распознавания представляет собой процедуру абстрагирования – выделение наиболее существенного, стабильного, повторяющегося в образах данного класса. При этом исключается из дальнейшего рассмотрения все второстепенное, малосущественное и переменчивое.

### **3. Биотехнические системы распознавания образов**

Выбор физических эффектов и стратегии распознавания. Первой задачей, с которой сталкивается разработчик системы распознавания, является выбор физических эффектов, на которых будет основано распознавание. Такими эффектами могут быть воздействия объекта на систему, предполагающие регистрацию излучаемого (отражаемого) объектом света, звука, электромагнитных волн и т.д. Либо взаимодействия объекта и системы, предполагающие, например, облучение объекта звуковыми и электромагнитными волнами и регистрацию их отражений, измерения электро и термопроводности объекта (его фрагментов), его звуко и газопроницаемости, веса и т.п.

При этом помимо выбора используемых физических эффектов одновременно производится выбор соответственно между пассивной и активной стратегией распознавания. Стратегия распознавания в технических системах, как и у живых организмов, является активной (лизнуть, потрогать, толкнуть и оценить реакцию), если предполагает взаимодействие системы и объекта, и является пассивной (смотреть, слушать, нюхать), если предполагает одностороннее воздействие объекта на систему распознавания.

Проблема выбора совокупности физических эффектов, обеспечивающей наиболее рациональное построение системы распознавания, является трудно формализуемой задачей. Для ее решения не удастся предложить сколь либо универсальный метод или систему методов. Здесь на принятие решения влияет ранее накопленный опыт проектировщика, широта его кругозора (в частности, глубина и широта его знаний физических эффектов, на которых может базироваться распознавание), его изобретательность, склонность к новаторству либо консерватизм и склонность следовать сложившиеся традиции.

Вектор образа

Далее будем полагать, что данные, поступающие от датчиков первичной информации, могут быть представлены вектором конечной размерности. Этот вектор далее будем называть вектором измерений или вектором образа.

Такой подход к формализованному представлению образа достаточно универсален.

Если первичная информация поступает от сенсорной сетчатки (например, светочувствительной), состоящей из  $n$  элементов, то результаты измерений можно представить вектором

$$x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n),$$

где  $x_i$  - интенсивность сигнала от  $i$ -го элемента сетчатки. При этом вектор  $x$  – вектор образа. В случае, если первичная информация поступает от датчика непрерывно изменяющегося воздействия (например, от микрофона, от магнитной головки магнитофона и т.п.), то вектор образа получают в результате записи значений сигнала  $x_i$  в дискретные моменты на заданном интервале времени.

Если первичная информация получается в результате измерений различных физических величин (электропроводности, упругости, магнитных свойств объекта, его веса и т. д.), вектор образа получают в результате записи в определенном порядке результатов  $x_i$  проведенных измерений.

### 3.1 Выделение признаков распознавания

Как уже отмечалось, выделение признаков распознавания представляет собой процедуру абстрагирования – выделение наиболее существенного, стабильного, повторяющегося в образах данного класса.

Эвристическое выделение признаков.

Во многих случаях выделение признаков является творческой задачей, решаемой проектировщиком системы распознавания без привлечения каких либо типовых методов. В таких случаях говорят о эвристическом формировании признаков распознавания.

Рассмотрим пример. Пусть среди множества изображений необходимо распознавать круг, квадрат и кольцо. Исходные данные поступают от светочувствительной сетчатки. Выделим характерные признаки, выделяющие перечисленные фигуры из множества всех других плоских фигур. При этом потребуем неизменности (инвариантности) результатов распознавания от местоположения изображения в кадре, а также от его размеров, ориентации и освещенности.

В качестве первого признака распознавания  $x_1$  можно использовать отношение периметра внешнего контура фигуры к расстоянию от центра фигуры до максимально удаленной от него точки фигуры. Это отношение для круга равно  $2\pi r = 6,28$ ; для квадрата  $8 \cdot 2^{-1/2} = 5,66$ ; для кольца  $2\pi r = 6,28$ .

Вычисление данного признака позволяет отличить круг и кольцо от квадрата, но не позволяет отличить круг от кольца. Поэтому необходимо использование дополнительного признака.

В качестве второго признака  $x_2$  можно использовать отношение квадрата периметра внешнего контура фигуры к ее площади. Это отношение для круга равно  $4\pi = 12,56$ ; для квадрата 16; для кольца  $> 4\pi$ .

Вычисление второго признака позволяет отличать друг от друга все три фигуры. Однако, использование совместно со вторым еще и первого признака делает распознавание более надежным в условиях наличия помех, обусловленных в том числе и ограниченной разрешающей способностью сенсорной сетчатки.

В геометрической интерпретации каждому из рассматриваемых образов соответствует точка на плоскости  $(x_1, x_2)$ . Классу образов «квадрат» - точка  $(8 \cdot 2^{-1/2}; 16)$ . Классу «круг» - точка  $(2\pi; 4\pi)$ . Классу «кольцо» - отрезок  $[2\pi; (2\pi, \text{бесконечность})]$ .

На практике используют приближенное определение перечисленных классов, как окрестностей указанных точек и отрезка. Такое определение класса позволяет игнорировать малые отклонения координат  $x_1, x_2$  от их идеальных значений, вызванные неидеальностью формы, а также влиянием ошибок округления и помех на результат вычисления признаков реально наблюдаемой фигуры. Очевидно, каждой точке плоскости  $x_1, x_2$  соответствует своя фигура.

Для надежного распознавания фигур, более разнообразных в сравнении с рассмотренными в данном примере, указанных выше признаков может оказаться недостаточно. В таких случаях приходится привлекать дополнительные признаки.

Типовые процедуры выделения признаков.

Наряду с эвристическим подходом к формированию признаков распознавания проектировщик может использовать ряд типовых методов выявления признаков, освещенных в соответствующей литературе. Рассмотрим один из них.

Формирование признаков для распознавания полутоновых изображений на основе Фурье - преобразований

Пусть имеется черно-белое полутоновое изображение, содержащее распознаваемый образ. При этом  $F_1(\phi)$  – функция изменения яркости изображения при обходе замкнутого контура в виде окружности с радиусом  $r_1$  и центром, совпадающим с центром распознаваемого образа,  $\phi$  - угол в полярной системе координат, определяющий положение точки на окружности с радиусом  $r_1$ .

Функция  $F_1(\phi)$  – периодическая функция с периодом  $2\pi$ . Аппроксимируем  $F_1(\phi)$  отрезком ряда Фурье:

$$F_1(\phi) = C_{11}\sin(\phi + \phi_{01}) + C_{12}\sin(2\phi + \phi_{02}) + \dots + C_{i1}\sin(i\phi + \phi_{0i}) + \dots + C_{1N}\sin(2\phi + \phi_{01N}) = \sum [C_{i1}\sin(i\phi + \phi_{0i})], i=1, \dots, N.$$

Использование нескольких контуров с радиусами  $r_1, \dots, r_j, \dots, r_M$  позволяет по значениям соответствующих им коэффициентов  $C_{ij}$  различать соответствующие образы.

Коэффициенты  $C_{ij}$  являются, таким образом, признаками распознавания, позволяющими при достаточно больших значениях  $N$  и  $M$  надежно отличать один образ от другого.

При выборе контуров обхода изображения в виде окружностей распознавание изображения не зависит от его ориентации (поворотов) относительно начала координат. Это объясняется следующим. При повороте изображения форма графика функции  $F_j(\phi)$  не изменяется. Он лишь сместится вдоль оси  $\phi$ , т.е. изменится лишь фаза  $\phi_{0j}$  функции  $F_j(\phi)$ , а значения коэффициентов  $C_{ij}$  сохраняются неизменными.

При помещении начала координат в центре распознаваемой фигуры, значения признаков становятся инвариантными к смещению рамки экрана относительно изображения, т.к. при этом система координат остается «привязанной» к одной и той же точке изображения и, следовательно, неизменными остаются графики функций  $F_j(\phi)$  и значения коэффициентов  $C_{ij}$ .

Инвариантность значений признаков к размеру изображения может быть достигнута путем выбора значений радиусов  $r_j$  контуров как определенной и неизменной доли характерного размера изображения, например, расстояния от центра тяжести фигуры до ее максимально удаленной части.

Для обеспечения независимости процедуры распознавания от общей яркости картинки вместо функции яркости картинки  $F_j(\phi)$  целесообразно использовать нормализованную функцию  $F_{nj}(\phi) = F_j(\phi)/F_j \max$ ,

где  $F_j \max$  – наибольшее значение функции  $F_j(\phi)$  при обходе  $j$ -го контура.

Увеличение числа используемых признаков позволяет расширить набор классов объектов, поддающихся распознаванию. Однако, на определенном этапе увеличение числа признаков может приводить к увеличению вероятности ошибочного распознавания.

Это ставит задачу выделения из множества возможных признаков наиболее важных. Решение этой задачи осуществляется на основе оценки для каждого признака степени влияния их изменения на решения, принимаемые системой распознавания. После чего отсеиваются те признаки, изменения которых наименее существенно сказывается на результатах.

Рассмотренные выше подходы к формированию признаков распознавания ориентированы на узнавание изображений, геометрических подобных одному из заданных эталонов. При этом признаки носят количественный характер и выражаются при помощи чисел.

Однако, существуют задачи распознавания, в которых опознание объектов основано не на их геометрическом подобии эталону, а на логическом анализе структуры изображения. Типичным примером, таких задач, является распознавание букв и цифр. Мы узнаем буквы и цифры, несмотря на их существенно различное начертание в силу различия почерков, используемых стилей и т.д. Мы узнаем их не потому, что они подобны некоторому эталону, а потому что их строение, соответствует некоторым правилам. Например, буква А по нашим представлениям обязательно должна иметь две ножки, расположенные ниже тела буквы, имеющего вид замкнутого контура. Буква В должна иметь два замкнутых контура, расположенных один под другим, причем левая грань каждого контура, должны быть образованы вертикальными прямыми линиями.

Соответственно признаки распознавания в таком случае выражаются уже не числами, а гораздо более сложными математическими структурами, которые качественно, а не количественно характеризуют распознаваемый образ.

На применении таких признаков базируются лингвистические (грамматические) методы распознавания образов.

Формирование лингвистических признаков распознавания

В рамках лингвистического анализа образа формирование признаков основано, во-первых, на выделении в изображении типовых элементов, в частности, замкнутых контуров, концевых точек, точек ветвления линий, и, во-вторых, на описании их взаимного расположения и ориентации.

Рассмотрим пример формирования признаков для лингвистического описания и распознавания буквы А.

На первом этапе производится переход от исходного полутонового изображения к контурному. При этом вначале осуществляется сегментация изображения, т.е. отнесение каждого элемента либо к образу либо к фону. С этой целью используют следующие методы.

1. Разделение по порогу яркости или степени зачерненности изображения. Если зачернение выше порогового уровня, компоненту относят к образу, если ниже, то к фону.

2. Обнаружение края. Компоненты относятся к фону либо к образу в зависимости от того, на какую сторону от границы перепада зачерненности они находятся.

3. Разделение изображения на области с одинаковыми значениями зачерненности.

Из полученного сегментированного изображения получают контурное. При этом широкие сплошные линии заменяют линиями толщиной в один пиксел, проходящими через их середину. Исключают случайные изолированные точки, сливают разорванные линии, спрямляют отдельные участки и т.д.

На втором этапе каждой точке изображения в соответствии с геометрическими свойствами ее окрестности приписывается определенный код. Код учитывает как направлена линия, проходящая через эту точку. При этом коды L, N, R, E означают соответственно направления: вверх и влево (left), вверх = (на север(north)), вверх и вправо (right), влево = (на восток(east)). Инверсии указанных кодов  $\sim L$ ,  $\sim N$ ,  $\sim R$ ,  $\sim E$  указывают соответственно противоположные направления. Данный этап называют маркировкой изображения.

На третьем этапе осуществляется анализ маркированного изображения. При этом выделяют все особые точки, к которым относят: концы линий, точки излома и точки ветвления линий, т.е. такие точки, с которыми соседствует точка с кодом, отличающимся от кода данной точки. После этого все особые точки заполняют прямолинейными отрезками. В результате получается граф, вершинами которого являются особые точки, а его дугами – отрезки, соединяющие вершины.

Вершины графа нумеруются в некотором порядке. Каждому такому номеру соответствует символ, обозначающий тип особой точки (концевая точка, угол, ветвление), и набор символов, характеризующих направление линий, исходящих из этой точки.

Полученный граф запоминается в виде соответствующей ему матрицы инцидентностей.

Каждый элемент полученной матрицы может рассматриваться как признак распознавания.

Важной положительной особенностью рассмотренной методики формирования признаков распознавания является то, что на каждом шаге указанного процесса все точки могут обрабатываться параллельно и независимо одна от другой.

Главным результатом, достигаемым в результате обработки данных на этапе выделения признаков, является снижение объема информации, используемой процедурой принятия решений в системе распознавания образов.

### **3.2 Робототехника**

Внутри самой кибернетики существует несколько основных направлений.

Теоретическая кибернетика, подобно математике, является, по существу, абстрактной наукой. Ни задача — разработка научного аппарата и методов исследования систем управления независимо от их конкретной природы. В теоретическую кибернетику вошли и получили дальнейшее развитие такие разделы прикладной математики, как теория информации и теория алгоритмов, теория игр, исследование операций. Ряд проблем теоретической кибернетики разработан уже непосредственно в недрах этого научного нал давления, а именно: теория логических сетей, теория автоматов, теория формальных языков и грамматик, теория преобразователей информации.

Кибернетика (от древнего греческого κυβερνητική — «искусство управления») — наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в различных системах, будь то машины, живые организмы или общество.



Термин «кибернетика» в современном понимании как наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах, живых организмах и обществе впервые был предложен Норбертом Винером в 1948 году.

Кибернетика рассматривает изучение обратной связи, чёрных ящиков и производных концептов, таких как управление и коммуникация в живых организмах, машинах и организациях, включая самоорганизации. Формально кибернетика создает основы понимания сложных процессов исполняемых в живых организмах, ориентированных на исполнение важнейших функций жизнедеятельности. Выделяя в списке задач особенности организации актов коммуникации кибернетика стремится создать устойчивое представление о реальности воспроизведения виртуальных объектов, также способных вступать в коммуникации с человеком. Такое представление в явном виде становится широко распространенной идеей благодаря успехам математики и вычислительной техники, способных создать доступный широкому пользователю набор программных продуктов. Возможность использовать математику в задачах моделирования поведения живого организма и в частности актов коммуникации воспроизводят несколько значимых направлений.

Теоретическая кибернетика включает также общеметодологические и философские проблемы этой науки.

Прикладная кибернетика, в зависимости от типа изучаемых систем управления, подразделяется на техническую, биологическую и социальную кибернетику.

Техническая кибернетика — наука об управлении техническими системами. Техническую кибернетику часто отождествляют с современной теорией автоматического регулирования и управления. Эта теория, конечно, служит важной составной частью технической кибернетики, но последняя вместе с тем включает вопросы разработки и конструирования автоматов (в том числе современных ЭВМ и роботов), а также проблемы технических средств сбора, передачи, хранения и преобразования информации, опознания образов и т. д.

Биологическая кибернетика изучает общие законы хранения, передачи и переработки информации в биологических системах. Биологическую кибернетику в свою очередь подразделяют на медицинскую, которая занимается главным образом моделированием заболеваний и использованием этих моделей для диагностики, прогнозирования и лечения; физиологическую, изучающую и моделирующую функции клеток и органов в норме и патологии; нейрокибернетику, в которой моделируются процессы переработки информации в нервной системе; психологическую, моделирующую психику на основе изучения поведения человека.

Кибернетика в биологии — исследование кибернетических систем в биологических организмах, прежде всего сосредотачиваясь на том, как животные приспосабливаются к их окружающей среде, и как информация в форме генов передается от поколения к поколению. Также имеется второе направление — киборги. Киборг как искусственный технический объект является результатом соединения технических устройств и набора программных модулей. Неразрывная связь материального мира (технические блоки) и информационных пакетов (набор программных продуктов) подмечена давно в живых системах, в частности организма человека. Здесь присутствует как материальная система объектов (скелет, мышцы, ткани) так и набор программных модулей (хромосомный набор - ДНК структура), обеспечивающих непрерывное развитие организма. Следуя этим представлениям представляется возможным создать искусственный объект, хотя и с ограниченными функциями исполнения установленных операций. Так, например, можно создать подвижный объект исполняющий рабочие операции по перемещению тяжелых объектов. Конструкция такого устройства содержит приводы - электромеханические узлы, работающие под контролем микропроцессора, снабженного определенной программой.

Приводы — это «мышцы» роботов. В настоящее время самыми популярными двигателями в приводах являются электрические, но применяются и другие, использующие химические вещества или сжатый воздух.



**ПРИИМЕР** - нога робота, работающая на электродвигателях. Двигатели постоянного тока: В настоящий момент большинство роботов используют электродвигатели, которые могут быть нескольких видов.

Шаговые электродвигатели: Как можно предположить из названия, шаговые электродвигатели не вращаются свободно, подобно двигателям постоянного тока. Они поворачиваются пошагово на определённый угол под управлением контроллера - микропроцессора.

Современной альтернативой двигателям постоянного тока являются пьезодвигатели, также известные как ультразвуковые двигатели. Принцип их работы весьма оригинален: крошечные пьезоэлектрические ножки, вибрирующие с частотой более 1000 раз в секунду, заставляют мотор двигаться по окружности или прямой. Преимуществами подобных двигателей являются высокое нанометрическое разрешение, скорость и мощность, несоизмеримая с их размерами.

Знание анатомии и основ биологии позволяет конструировать воздушные мышцы — простое, но мощное устройство для обеспечения силы тяги. При накачивании сжатым воздухом мышцы способны сокращаться до 40 % от своей длины. Причиной такого поведения является плетение, видимое с внешней стороны, которое заставляет мышцы быть или длинными и тонкими, или короткими и толстыми. Так как способ их работы схож с биологическими мышцами, их можно использовать для производства роботов с мышцами и скелетом, аналогичными мышцам и скелету животных.

В этом направлении создаются конструкции на основе электро активных полимеров — это вид пластмасс, который изменяет форму в ответ на электрическую стимуляцию. Они могут быть сконструированы таким образом, что могут гнуться, растягиваться или сокращаться.

Философия современного мира, оперирующая понятиями модели развития окружающего мира чрезвычайно многообразна. В таком понимании проникновение в повседневную практику идей киберов рассматривается как расширение образа мира.

Начиная с Эммануила Канта, философия постепенно развивалась от идеи уникальной реальности единственного неизменного мира к идее множества миров. Кант элиминировал понятие мира заранее данного, поместив основные формы не во внешний мир, но и в человеческое сознание. Категории рассудка (причинность и материя) вместе с формами чувственного познания (пространство и время) упорядочивают хаотические данные чувственного восприятия, отливая опыт в интеллигибельную и коммуникабельную структуру. Но и Кант, чтобы упорядочить наше представление о мире, по-прежнему постулировал монистический идеал единства. Мир, который мы создаем, думал он, стремится к единству, которое разделяют все. Кант отстаивал ньютоновскую науку своей эпохи, исходя из учения о якобы абсолютных формах, помещенных в человеческом суждении.

Развитие компьютерной техники и построение сетей связи с многочисленными информационными ресурсами создали основы развития поисковых систем. Вначале такие системы исполняли обычные задачи отыскания заданных информационных пакетов. По мере развития технологии запросов появились «мудрые» программные продукты, отчасти реализующие функции «обсуждения» результатов поиска. Поскольку сами запросы формировались человеком и результаты запросов оценивались человеком, работа таких сервисов все больше напоминала творческую деятельность самого человека, но реализуемую сложными программными продуктами. Такие программы создавали иллюзию общения человека с компьютером. На этой основе появляется направление по созданию «зрительных образов» программ, реализующих некоторые творческие способ-

ности человека. По сути это направление порождает работы по конструированию визуального образа собеседника человека. Такие разработки направлены на создание виртуальных помощников - роботов (киберов), не имеющих материальное воплощение. Здесь большое внимание уделяется анатомии и процессам мимического сопровождения диалога. Разработка таких виртуальных образов осуществляется с использованием основ бионики.

Промежуточным звеном между биологической и технической кибернетикой является бионика — наука об использовании моделей биологических процессов и механизмов в качестве прототипов для совершенствования существующих и создания новых технических устройств. Киберпространство также пробуждает наше восприятие. Киберпространство - это большая электронная сеть, в которой свернуты виртуальные реальности. Виртуальная реальность - только один из многих типов явлений внутри электронного пространства. Подобно всякому медиуму, киберпространство вовлекает в общение. В структуре сегодняшнего мира киберпространство - это набор тематических линий позволяющих узнать принципы организации нашего мира и мира Природы.

### **3.3 Мехатроника**

Научное направление робототехники создавалось на основе законов механики. Историю мехатроники принято отсчитывать с 1969 года, когда японская фирма Yaskawa Electric ввела новый термин "Мехатроника" как комбинацию слов "Механика" и "Электроника". В 1972 году фирма зарегистрировала этот термин как товарный знак. Первоначально мехатронными системами считались только регулируемые электроприводы. Затем сюда стали относить автоматические двери, торговые автоматы, мобильные средства и фотокамеры с автофокусировкой. В 80-х годах класс мехатронных систем пополнился станками с числовым программным управлением, промышленными роботами и новыми видами бытовых машин (посудомоечных, стиральных и т.п.). В последнее десятилетие очень большое внимание уделяется созданию мехатронных модулей для современных автомобилей, нового поколения технологического оборудования (станков с параллельной кинематикой, роботов с интеллектуальным управлением), микромашин, новейшей компьютерной и офисной техники.

Важно подчеркнуть, что толчком для становления мехатроники стали не общие теоретические идеи (как это было, например, в истории робототехники), а технические достижения инженеров-практиков в различных отраслях. Затем заинтересованные организации в конце 80-х годов стали объединяться в научно-технические сообщества. В России координацию научно-технических работ в настоящее время осуществляет Ассоциация инновационного машиностроения и мехатроники. Аналогичные организации были созданы и во многих странах Европы, где особенно следует выделить деятельность UK Mechatronics Forum (Великобритания), который возглавляет проф. Ф.Р.Мор (Prof. P.K. Moore) из Де Монтфортского университета (г.Лейстер).

Современная робототехника возникла во второй половине XX столетия, когда в ходе развития производства появилась реальная потребность в универсальных манипуляционных машинах-автоматах, и одновременно возникли необходимые для их создания научно-технические предпосылки и, прежде всего, кибернетика и вычислительная техника.

Современными предшественниками МС явились различного рода устройства для манипулирования на расстоянии объектами, непосредственный контакт человека с которыми опасен или невозможен. Это манипуляторы с ручным или автоматизированным управлением. Первые появившиеся устройства такого рода были пассивными, т. е. механизмами без приводов, и служили для повторения на расстоянии движений руки человека целиком за счет его мускульной силы. Затем были созданы манипуляторы с приводами и управляемые человеком различными способами вплоть до биоэлектрического.

Впервые такие манипуляторы были созданы в 1940—1950 гг. для атомных исследований, а затем и для атомной промышленности. Подобные устройства стали применяться 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. Согласно современному определению, это был прообраз осязательного робота с адаптивным управлением, что позволило ему, например, находить и брать произвольно расположенные предметы.

Первые серьезные результаты по созданию и практическому применению роботов в СССР относятся к 1960-м гг. 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. был создан первый управляемый ЭВМ подводный автоматический манипулятор. В 1971 г. в Ленинградском политехническом институте были построены образцы интегральных роботов, снабженных развитой системой осязания, включая техническое зрение и речевое управление. В том же году в Ленинграде состоялся первый Всесоюзный семинар, посвященный роботам, управляемым 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 и определены основные направления ее решения. В следующем году была утверждена первая программа работ, 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 и прессов, для нанесения покрытий и точечной сварки) на пневмо-, гидро- и электроприводах, стационарных и подвижных..

В следующие годы 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 в соответствии с программой 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 составлял 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 осязания 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.

Механотроника находится только в стадии становления, поэтому на сегодняшний день ее определение и базовая терминология еще полностью не сформирована. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть определения, выражающих суть предмета механотроники как в широком, так и в узком (специальном) смысле. Механотроника изучает синергетическое объединение узлов механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.



Рис. 3.1. Определение механотронных систем.

В состав мехатронной системы (МС) входят следующие основные компоненты:

- механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
- блок приводов, включающий силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- устройство компьютерного управления, верхним уровнем для которого является человек-оператор, либо другая ЭВМ, входящая в компьютерную сеть;
- сенсоры, предназначенные для передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии блоков машины и движении МС.

Таким образом, наличие трех обязательных частей - механической (точнее электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком, отличающим мехатронные системы.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (например, тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев и требуемое движение рабочего органа.

Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей. Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления (УКУ). В состав УКУ мехатронной системы обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- I. Управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации.
- II. Организация управления функциональными движениями МС, которая предполагает координацию управления механическим движением МС и сопутствующими внешними процессами. Как правило, для реализации функции управления внешними процессами используются дискретные входы/выходы устройства (на схемах они обычно обозначаются I/O).
- III. Взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования и непосредственно в процессе движения МС.
- IV. Организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование информации о цели управления, поступающей с верхнего уровня, в целенаправленное функциональное движение системы с управлением на основе принципа обратной связи.

Характерно, что электрическая энергия используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма. Таким образом, для физической реализации мехатронной системы теоретически необходимы четыре основных функциональных блока: последовательно соединенные информационно-электрический и электромеханический энергетические преобразователи в прямой цепи и электро-информационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Если работа силовой части машины с энергетической точки зрения основана на гидравлических, пневматических или комбинированных (например, электрогидравлических) процессах, то очевидно необходимы соответствующие преобразователи и датчики в цепи обратной связи.

Сущность мехатронного подхода состоит в том, что он направлен на интеграцию конкретного класса элементов (механических, электронных, компьютерных, электротехнических, интерфейсных и др.), которые имеют принципиально различную физическую природу и предназначены для реализации сложного функционального движения. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения. Программные средства МС должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени. Таким образом, проектирование МС предполагает разработку комплекса аппаратно-программных средств, ориентированных на конкретные прикладные задачи.

#### **4 Типовые конструкции**

Рассмотрим основные виды однокоординатных модулей движения, разработанных для решения задач автоматизированного машиностроения. Мехатронные модули движения (ММД) являются функциональными "кубиками", из которых затем можно компоновать сложные мехатронные системы.

##### *Моторы-редукторы*

Моторы - редукторы являются, по-видимому, исторически первыми по принципу своего построения мехатронными модулями, которые стали серийно выпускаться и нашли очень широкое применение в приводах различных машин и механизмов. Мотор-редуктор представляет собой компактный конструктивный модуль, объединяющий электродвигатель и редуктор. По сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора через муфту моторы-редукторы обладают целым рядом существенных преимуществ:

- сокращение габаритных размеров ;
- снижение стоимости за счет сокращения количества присоединительных деталей, уменьшения затрат на установку, наладку и запуск изделия;
- улучшенные эксплуатационные свойства (пыле- и влагозащищенность, минимальный уровень вибраций, безопасность и надежность работы в неблагоприятных производственных условиях).

подавляющее большинство электрических машин работает по принципу магнитного отталкивания и притяжения. Если между северным и южным полюсами магнита поместить проволоку и пропустить по ней ток, то её вытолкнет наружу.

Дело в том, что проходя по проводнику, ток формирует вокруг себя круговое магнитное поле по всей длине провода. Направление этого поля определяют по правилу буравчика (винта). Коллектор это механический инвертор. Его задача переключать напряжение якоря туда-обратно, подставляя обмотку под поток.



Коллектор в электрических машинах выполняет роль выпрямителя переменного тока в постоянный (в генераторах) и роль автоматического переключателя направления тока во вращающихся проводниках якоря (в двигателях).

Когда магнитное поле пересекается только двумя проводниками, образующими рамку, коллектор будет представлять собой одно кольцо, разрезанное на две части, изолированные одна от другой. В общем случае каждое полукольцо носит название коллекторной пластины.

### ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

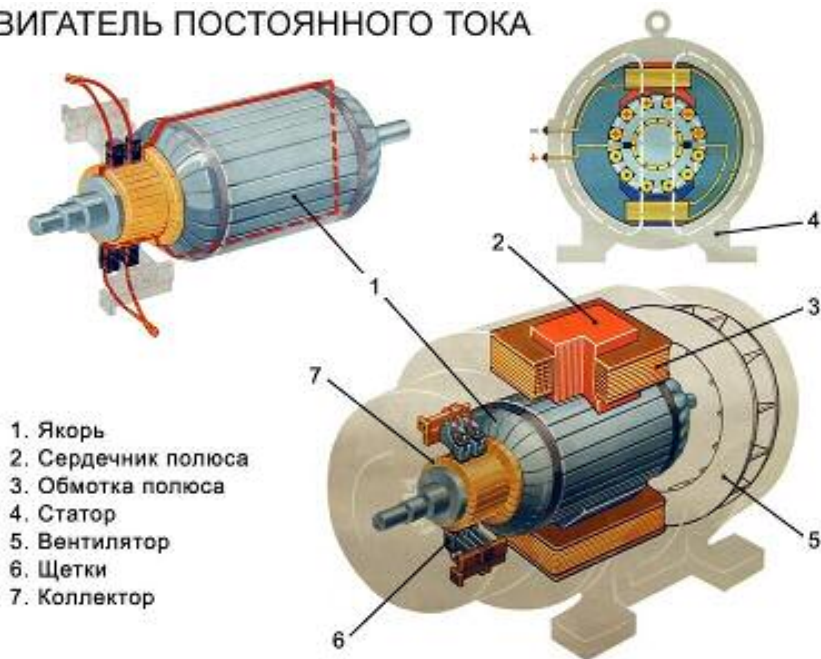


Рис. 4.1 Электрический двигатель

В настоящее время трудно представить себе жизнь человечества без электродвигателя. Он используется в поездах, троллейбусах, трамваях. На заводах и фабриках стоят мощные электрические станки. Электромясорубки, кухонные комбайны, кофемолки, пылесосы — всё это используется в быту и оснащено электродвигателями.

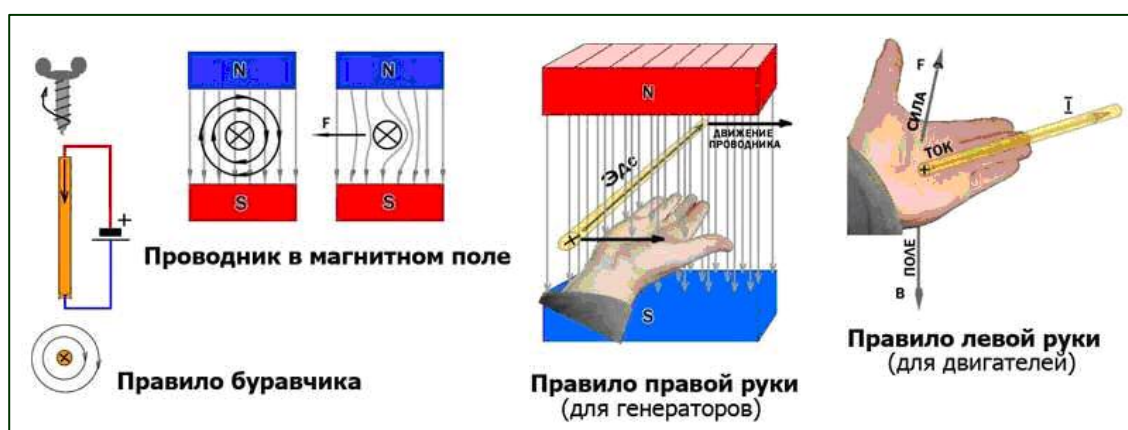


Рис. 4.2 Физический принцип работы электродвигателя

Щёточный узел необходим для подвода электроэнергии к катушкам на вращающемся роторе и переключения тока в обмотках ротора. Щётка — неподвижный контакт (обычно графитовый или медно-графитовый). Щётки с большой частотой размыкают и замыкают пластины-контакты



коллектора ротора. Как следствие, при работе ДПТ происходят переходные процессы, в обмотках ротора. Эти процессы приводят к искрению на коллекторе, что значительно снижает надёжность ДПТ. Для уменьшения искрения применяются различные способы, основным из которых является установка добавочных полюсов. При больших токах, в роторе ДПТ возникают мощные переходные процессы, в результате чего, искрение может постоянно охватывать все пластины коллектора, независимо от положения щёток. Данное явление называется кольцевым искрением коллектора или «круговой огонь»

При взаимодействии кругового поля проводника и однородного поля магнита, между полюсами магнитное поле с одной стороны ослабевает, а с другой усиливается. То есть среда становится упругой и результирующая сила выталкивает провод из поля магнита под углом 90 градусов в направлении, определяемом по правилу левой руки (правило правой руки используется для генераторов, а правило левой руки подходит только для двигателей).

Продолжая тему двигателя постоянного тока нужно отметить, что принцип действия электродвигателя основывается на инвертировании постоянного тока в якорной цепи, чтобы не было торможения, и вращение ротора поддерживалось в постоянном ритме. Если изменить направление тока в возбуждающей обмотке статора, то, согласно правилу левой руки, изменится направление вращения ротора. То же самое произойдёт, если мы поменяем местами щёточные контакты, подводящие питание от источника к якорной обмотке. А вот если поменять «+» «-» и там и там, то направление вращения вала не изменится. Поэтому, в принципе, для питания такого мотора можно использовать и переменный ток, т.к. ток в индукторе и якоре будет меняться одновременно.

Редукторы и мотор-редукторы. Это конструкция в которой сочетается механическая и электрическая сборка. Редуктор применяется для изменения частоты вращения электродвигателя и увеличения момента

Конструктивное исполнение модуля определяется типами используемых редуктора и электродвигателя. В зависимости от технических требований задачи применяются цилиндрические, насадные, конические, червячные и другие виды редукторов. В качестве электродвигателей наиболее часто используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемые преобразователи частоты вращения, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока.

Мехатронные модули вращательного движения на базе высокомоментных двигателей

Следующим шагом в развитии приводной техники стало появление высокомоментных двигателей вращательного движения, применение которых позволило вообще исключить механический редуктор из состава электроприводов постоянного тока, работающих на низких скоростях.

Высокомоментными называются двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией обмоток, которые допускают многократную перегрузку по моменту.

Для определения положения полюсов на роторе вентильного высокомоментного двигателя (ВМД) устанавливают дополнительные технические средства (например, датчики Холла, индуктивные и фотоэлектрические датчики).

Обычно высокомоментные двигатели (ВМД) устойчиво работают на частотах вращения 0.1- 1000 об./мин, которые типичны для металлорежущих станков и промышленных роботов.

Основные преимущества ВМД определяются отсутствием в приводе редуктора:

- снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров;
- исключение трения в механической трансмиссии позволяет существенно уменьшить погрешности позиционирования и нелинейные динамические эффекты на ползучих скоростях;
- повышение резонансной частоты. ВМД выпускаются в настоящее время коллекторного и вентильного (иногда используется термин «бесщёточного», либо «бесконтактного») типов.



Рис. 4.3 Двигатели типа ВМД

Основные преимущества вентильных двигателей по сравнению с коллекторными:

- высокая надежность, большой срок службы, минимальные затраты на обслуживание ( вследствие исключения искрения и износа щеток);
- улучшенные тепловые характеристики (так как тепло рассеивается на обмотках статора, а на роторе тепловыделяющие элементы отсутствуют), отсюда возможность использования проводов малого сечения;
- высокое быстродействие за счет высокого соотношения развиваемый момент/ момент инерции ротора;
- большая перегрузочная способность по моменту (типично  $M_{ср}/M_{но.} = 8$ ) в широком диапазоне регулирования скорости;
- близкие к линейным механические и регулировочные характеристики.

По сравнению с синхронными двигателями вентильные ВМД позволяют регулировать скорость вращения с помощью обратной связи, частота вращения не зависит от напряжения питания, нет проблемы выпадения из синхронизма.

Основной недостаток вентильных двигателей - наличие дорогостоящих магнитов и блока управления коммутацией обмоток, отсюда пониженный показатель мощность/цена и повышенные габариты. В современных модификациях эта проблема решается путем построения этих блоков на базе относительно дешевых интегральных микросхем.

Бесколлекторные (brushless англ.) электродвигатели пришли к нам сравнительно недавно, в последние 10-15 лет. В отличие от коллекторных моторов они питаются трехфазным переменным током. Бесколлекторные двигатели эффективно работают в более широком диапазоне оборотов и имеют более высокий КПД. Конструкция двигателя при этом относительно проще, в ней нет щеточного узла, который постоянно трется с ротором и создает искры. Можно сказать, что бесколлекторные моторы практически не изнашиваются. Стоимость бесколлекторных двигателей несколько выше, чем коллекторных. Это вызвано тем, что все бесколлекторные моторы снабжены подшипниками и, как правило, изготовлены более качественно.

По конструкции бесколлекторные моторы делятся на две группы: *inrunner* (произносится как "инраннер") и *outrunner* (произносится как "аутраннер"). Двигатели первой группы имеют расположенные по внутренней поверхности корпуса обмотки, и вращающийся внутри магнитный ротор. Двигатели второй группы - "аутраннеры", имеют неподвижные обмотки, внутри двигателя, вокруг которых вращается корпус с помещенными на его внутреннюю стенку постоянными магнитами. Количество полюсов магнитов, используемых в бесколлекторных двигателях, может быть разным. По количеству полюсов можно судить о крутящем моменте и оборотах двигателя. Моторы с двухполюсными роторами имеют наибольшую скорость вращения при наименьшем крутящем моменте.

В отличие от щётчного электродвигателя постоянного тока, коммутация в бесколлекторном двигателе (БД) осуществляется и контролируется с помощью электроники. Принцип работы БД основан на том, что контроллер БД коммутирует обмотки статора так, чтобы вектор магнитного поля статора всегда был под углом 120 градусов к вектору магнитного поля ротора.

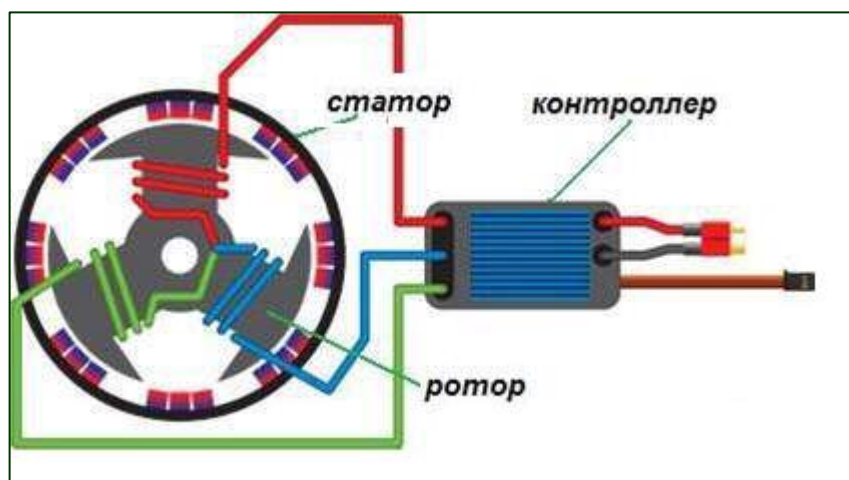


Рис. 4.4 Схема подключения контроллера

Статор представляет собой второй набор катушек в качестве внешней оболочки ротора, который, в отличие от крутящегося ротора, остаётся всегда в фиксированном положении.

Данный тип двигателя создан с целью улучшения свойств электродвигателей постоянного тока. Высокие требования к исполнительным механизмам (в частности, высокооборотных микроприводов точного позиционирования) обусловили применение специфических двигателей постоянного тока: бесконтактных трехфазных двигателей постоянного тока.



В состав современных мехатронных модулей движения на основе ВМД обязательно входят также датчики обратной связи и иногда управляемые тормоза, что позволяет отнести такие ММД ко второму поколению. В качестве датчиков наиболее часто применяются фотоимпульсные датчики (инкодеры), тахогенераторы, резольверы и кодовые датчики положения. Принципиально важно, что модуль "двигатель-датчик" имеет единый вал, что позволяет сочетать высокие технические параметры и низкую стоимость.

Также модули данного типа могут применяться в нетрадиционных транспортных средствах: электромобилях, электровелосипедах, инвалидных колясках и т.п.

#### *Мехатронные модули линейного движения*

Мехатронный подход к построению модулей вращательного движения на базе высокомоментных двигателей получил в последние годы свое развитие и в модулях линейного перемещения. Цель проектирования аналогична - исключить механическую передачу из состава ММД.

Мехатронные модули движения на основе линейных высокомоментных двигателей (ЛВМД) находят все большее применение в гексаподах, высокоскоростных станках (многоцелевых, фрезерных, шлифовальных), комплексах для лазерной и водоструйной резки, вспомогательном оборудовании (крестовых столах, транспортерах).

Традиционные электроприводы линейных перемещений включают в себя двигатель вращательного движения и механическую передачу для преобразования вращения в поступательное движение (шариико-винтовую передачу (ШВП), зубчатую рейку, ленточную передачу и т.п.). С начала 80-х годов известны разработки собственно линейных двигателей, однако из-за низких удельных силовых показателей они имели ограниченную область применения (графопостроители, координатно-измерительные машины) и в автоматизированном оборудовании не могли быть использованы.

Основные преимущества модулей на базе ЛВМД по сравнению с традиционными линейными приводами:

- повышение в несколько раз максимальной скорости движения (до 150-210 м/мин) и ускорения (в перспективе до 5g);
- высокая точность реализации движения;
- высокая статическая и динамическая жесткость.

Вместе с тем имеется ряд проблем при проектировании и внедрении ЛВМД: более высокая стоимость, необходимость использования систем охлаждения ММД (жидкостной или воздушной), относительно невысокий к.п.д. модуля.

Мехатронные модули типа "двигатель - рабочий орган"

Важным этапом развития мехатронных модулей движения стали разработки модулей типа "двигатель-рабочий орган". Такие конструктивные модули имеют особое значение для технологических мехатронных систем, целью движения которых является реализация целенаправленного воздействия рабочего органа на объект работ.

#### **4.1 Интеллектуальные модули движения**

Главной особенностью современного этапа развития мехатронных модулей является интеллектуализация процессов управления их функциональными движениями. По сути речь идет о разработке принципиально нового поколения модулей, в которых осуществлена интеграция всех трех компонент - электромеханической, электронной и компьютерной. Техническая реализация интеллектуальных мехатронных модулей движения (ИММД) стала возможной благодаря бурному развитию в последние годы микропроцессорных систем, ориентированных на задачи управления движением. Постоянное совершенствование производственных технологий ведет к стабильному снижению стоимости аппаратных средств, что сделало их к настоящему времени рентабельными для практического внедрения.

Можно выделить три направления интеллектуализации мехатронных модулей движения, которые классифицируются в зависимости от интерфейсных точек интеграции :

- I. Развитие интегрированных интерфейсов, связывающих управляющий контроллер с компьютером верхнего уровня в единый аппаратно- программный управляющий комплекс.
- II. Создание интеллектуальных силовых модулей управления путем интеграции управляющих контроллеров и силовых преобразователей.
- III. Разработка интеллектуальных сенсоров мехатронных модулей, которые дополнительно к обычным измерительным функциям осуществляют компьютерную обработку и преобразование сигналов по гибким программам.

##### *Контроллеры движения*

Первое из указанных направлений заключается в создании нового поколения компьютерных устройств, позволяющих пользователю гибко и быстро решать весь комплекс задач управления движением модуля.

Можно разделить задачу управления движениями мехатронных систем на две основные части: планирование движения и его исполнение во времени. Задачу планирования движения и автоматизированного формирования программы управления решает компьютер верхнего уровня,

который получает целеуказание от человека-оператора. Функцию расчета и выдачи управляющих сигналов непосредственно на исполнительные приводы выполняет контроллер движения. Таким образом, сочетание компьютера и контроллера в архитектуре УКУ является обоснованным с точки зрения разделения решаемых подзадач управления.

Лишь в простейших модулях иногда используются сепаратные контроллеры, которые привлекательны для пользователей своей относительной дешевизной. Функции такого контроллера ограничены задачей управления механическим движением по одной координате (редко по двум), некоторые модификации имеют стандартный интерфейс для включения в более сложные управляющие структуры. Однако необходимость программирования непосредственно оператором на языке достаточно низкого уровня (типа BASIC), малое количество каналов связи и ограниченный объем памяти делают этот тип контроллеров неперспективным для многокоординатных мехатронных систем с интеллектуальными методами управления.

Современные контроллеры обычно реализуют управление с обратной связью по положению и/или скорости управляемого механического объекта, т.е. мехатронная система управления является замкнутой на исполнительном уровне. Принцип разомкнутого управления в настоящее время используется только в системах управления шаговыми двигателями.

Такие двигатели применяются, например в графопостроителях, плоттерах, поворотных столах и других устройствах, которые не испытывают существенных возмущающих воздействий. В оборудовании автоматизированного машиностроения (металлорежущих станках, технологических роботах) обеспечить приемлемую точность движения<sup>1</sup> можно только используя замкнутые системы управления.

Для реализации функциональных движений контроллеры имеют также дополнительные входы/выходы для связи с внешним оборудованием. Как правило, это сигналы, дискретные по форме (I/O). Здесь уместно обратить внимание на очень широкое распространение в промышленных системах автоматики программируемых логических контроллеров (ПЛК). Главная задача ПЛК - это эффективные операции исключительно с дискретной информацией. Поэтому построение на базе ПЛК систем управления движением мехатронными модулями, и тем более мехатронными системами, логически нецелесообразно. Но при этом возможен обмен информацией между контроллерами управления движением и ПЛК через блок дискретных входов/выходов.

Наиболее распространены в настоящее время два метода формирования контроллером управляющих сигналов для силового преобразователя:

- аналоговые командные сигналы;
- модулированные управляющие сигналы.

Для формирования аналоговых управляющих сигналов необходим цифро-аналоговый преобразователь, который выдает электрические напряжения (обычно от -10В до +10В постоянного тока). С энергетической точки зрения выгодным считается метод широтно-импульсного управления силовыми ключами преобразователя.

*Примечание.* В технических описаниях контроллеров величины перемещений обычно имеют размерность [Имп] (Steps или Counts), а скорости соответственно [Имп/с] (Steps/sec или Counts/sec). Данные значения важны тем, что определяют собственные возможности контроллера без учета параметров датчиков обратной связи. Для определения параметров движения в системе единиц СИ следует разделить указанные числа на коэффициенты выбранных датчиков. Положим, что стандартный угловой фотоимпульсный датчик (инкодер) имеет коэффициент 5000 Имп/об, а выбранный резольвер - коэффициент 65000 Имп/об. Тогда при паспортной характеристике контроллера 1 000 000 имп/с получаем максимальные скорости вращения двигателя соответственно 200 об/с при использовании инкодера и 15.38 об/с при установке резольвера.

При создании интеллектуального мехатронного модуля возможны два базовых варианта аппаратной архитектуры УКУ:

- использование компьютера верхнего уровня и контроллера движения как отдельных устройств, соединенных стандартным интерфейсом (в этом случае контроллер является внешним блоком по отношению к компьютеру);
- моноблочная структура, когда контроллер аппаратно устанавливается внутрь компьютера ("встраиваемый контроллер").

Данные аппаратные схемы имеют различные области предпочтительного применения. Архитектуру типа "внешний контроллер" целесообразно использовать в больших мехатронных системах, состоящих из нескольких многокоординатных управляемых машин (станков, роботов, вспомогательного оборудования). В таких системах компьютер выполняет функции сервера, решая задачи планирования движений, диспетчирования и управления работой всех контроллеров комплекса. Архитектура на базе встраиваемых контроллеров ориентирована на задачи координированного управления движением нескольких мехатронных модулей, входящих в состав как правило одной мехатронной системы

Планирование функциональных движений осуществляется оператором на компьютере верхнего уровня с использованием пакетов прикладных программ. Компьютер выполняет также автоматическую генерацию команд для контроллера, которые поступают на исполнение через стандартный интерфейс (например, RS-232C). Эти команды задают желаемые законы изменения во времени положения, скорости и ускорения вала исполнительного двигателя. Типичным является трапецеидальный закон изменения скорости движения, включающий участки разгона, перемещения с постоянной скоростью и торможения с заданным ускорением .

Архитектура типа "встраиваемый контроллер" заключается в использовании персонального компьютера (PC) в качестве аппаратной платформы устройства управления движением. Это позволяет сочетать функции планирования и управления функциональными движениями мехатронными модулями и системами, сбора и обработки информационно-измерительных данных в аппаратно и программно едином устройстве. Важным с точки зрения пользователя достоинством такого подхода является интеграция стандартных операционных систем и программных средств (AutoCAD, Excel, Windows NT/95/3.1, C++ и т.п.) с системами программирования движений. Объединение управляющих компьютеров в сеть дает возможность создавать распределенные управляющие комплексы для задач автоматизации производственных ячеек, цехов и предприятий. При этом модульная архитектура на базе PC промышленного исполнения гарантирует эффективную защиту аппаратной части от тепловых, вибрационных и других воздействий производственной среды.

Технически встраиваемые контроллеры движения выпускаются в виде специальных плат (plug-in card ), устанавливаемых в дополнительный слот PC . Обмен данными между контроллером и PC осуществляется через стандартную шину (обычно 32-битная) адреса и данных. Примерами типичных шин могут служить стандарты ISA, STD, VME и IBM-PC Bus. На плате контроллера также имеются необходимые разъемы для подключения силового преобразователя привода, датчиков обратной связи (аналоговых и цифровых), внешних устройств с дискретным входом/выходом.

#### *Интеллектуальные силовые модули*

Проведем анализ возможных способов интеллектуализации мехатронных модулей и рассмотрим подход, направленный на интеграцию контроллеров движения и силовых преобразователей. Такое решение целесообразно для многомерных мехатронных систем, компоненты которых расположены на значительном удалении друг от друга. В этих случаях комплексировать систему управления на базе одного персонального компьютера очень сложно, а иногда и технически невозможно из-за проблем передачи сигналов и данных на большие расстояния. Так, стандартный протокол RS-232 позволяет передавать данные на расстояния не более, чем 9.15 м.

Блок управления каждым модулем в таких системах встраивается в корпус преобразователя или даже в клеммную коробку электродвигателя. Такие модули получили название интеллектуальных силовых модулей - ИСМ.

Интеллектуальные силовые модули строятся на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), запираемые тиристоры с полевым управлением (MCT). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов IGBT частота коммутации составляет до 50 000 Гц, для транзисторов MOSFET - 100000Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для IGBT : предельная сила коммутируемого тока - до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение - до 3500 В), малая мощность управления.

В состав ИСМ входят, кроме традиционных приборов силовой электроники (ключей на базе силовых транзисторов или тиристоров, диодов и др.), элементы микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций - управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСМ в составе приводов мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

#### *Интеллектуальные сенсоры мехатронных модулей и систем*

Целью создания интеллектуальных сенсоров является объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и компьютерной обработки по заданным алгоритмам в едином информационно-измерительном модуле. Со структурной точки зрения речь идет об интеграции сенсорного и компьютерного блоков мехатронного модуля. Интеллектуализация сенсоров позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечив в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

В мехатронных модулях сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии элементов движущейся системы (исполнительного привода, механического устройства и рабочего органа), обработки в реальном времени и передачи сигналов обратной связи в устройство компьютерного управления.

К типичным измеряемым величинам, информация о которых используется при управлении мехатронными модулями и системами, относятся: перемещение (линейное или угловое), скорость, ускорение и моменты, развиваемые исполнительными двигателями; внешние усилия, действующие на рабочий орган (например, на шпиндель модулей); положение и ориентация рабочего органа в пространстве (например, схвата промышленного робота или щупа контрольно-измерительной машины).

В целом проблема проектирования и технологии производства интеллектуальных сенсоров (ИС) является самостоятельной научно-технической областью и выходит за рамки рассматриваемого круга вопросов. Для мехатроники представляют интерес способы интеграции ИС в мехатронные модули движения и методы минимизации промежуточных преобразований измеряемой физической величины в цифровой код, пригодный для ввода в устройство компьютерного управления.

С точки зрения минимизации промежуточных преобразований одним из наиболее эффективных (и потому очень широко применяемых в мехатронике) интеллектуальных датчиков обратной связи являются оптические инкодеры со встроенными микропроцессорами. Среди отличительных преимуществ современных инкодеров следует выделить: возможность определения как перемещения, так и скорости движения; высокую точность и низкие шумы при измерении; многооборотность; конструктивную компактность и возможность встраивания в мехатронный модуль. Важно подчеркнуть, что инкодеры выдают выходной сигнал в кодовой форме, что удобно для компьютерной обработки в реальном времени.



Различают два основных вида инкодеров - абсолютные и инкрементальные. Абсолютные инкодеры дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) движущегося вала относительно фиксированного нулевого положения.

Преимуществами абсолютного инкодера являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, что вполне достаточно во многих практических приложениях.

Интеллектуализация инкодеров обеспечивается встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передача текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании инкодеров заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Интеграционная направленность мехатроники стимулирует развитие так называемых гибридных технологий для производства особо компактных и миниатюрных модулей. Гибридные технологии предусматривают использование единых материалов (в первую очередь полупроводниковых - например, кремния) как для механических, так и для микроэлектронных компонент. Это позволяет радикально уменьшать размеры модуля без увеличения его стоимости, что практически невозможно при традиционных производственных технологиях.

Другим примером реализации гибридных технологий, ориентированным на массового потребителя, может служить проект интеллектуальной авторучки, позволяющей писать на бумаге с одновременным вводом текста в компьютер. Для кодирования графической информации используются пьезоэлектрический датчик силы/ускорения и датчик угла наклона ручки. Размещение как чувствительных элементов пьезодатчика, так и всех электронных цепей на одном кремниевом кристалле позволит, по мнению авторов, добиться желаемых габаритов авторучки (не превышающих размеров обычного маркера) при доступной для потребителя цене.

Интересным направлением является применение в интеллектуальных мехатронных модулях косвенных методов измерения параметров механического движения. В этом случае можно вообще отказаться от установки типичных датчиков (даже встроенных), добиваясь минимальных габаритов и материалоемкости модуля. Величины скорости, положения, действующего момента рассчитываются компьютерным блоком по математическим моделям протекающих электромеханических процессов (поэтому иногда применяется термин "виртуальные датчики").

Хорошо известен способ косвенного определения момента, развиваемого двигателем постоянного тока, по пропорциональной величине тока в якорной цепи, который часто используется в промышленных приводах. В последнее время разработан ряд методов и устройств косвенного измерения скорости электродвигателей. Так, стабилизировать скорость вращения асинхронного двигателя можно без установки датчика скорости на его валу, поддерживая в обмотке статора отношение тока к напряжению на заданном уровне с помощью обратной связи по току статора.

Для трехфазных вентильных двигателей малой мощности разработан метод коммутации обмоток по ЭДС вращения, позволивший устранить традиционные датчики положения ротора из конструкции двигателя. Все методы косвенного измерения требуют построения адекватных математических моделей и их эффективной компьютерной реализации в реальном времени, включая алгоритмы фильтрации помех, статистической обработки измерений и цифрового кодирования информации. Появление на рынке быстродействующих и недорогих встроенных микропроцессорных средств делает эти методы перспективными для интеллектуальных мехатронных модулей - модулей нового поколения.

## 4.2 Промышленные и мобильные роботы

В последние годы происходит роботизация буквально всех сфер человеческой деятельности. Диапазон применения робототехники чрезвычайно широк:

- роботы вытесняют человека на производстве. Полная автоматизация многих процессов сводит участие людей в производстве к принятию важных решений и устранению возникающих неисправностей оборудования;
- роботы используются при исследованиях космического пространства и океанских глубин;
- с помощью роботов проводятся сложнейшие хирургические операции на мозге и сердце. Разработаны роботизированные протезы конечностей и некоторых внутренних органов;
- военная техника становится все умней и самостоятельней – управление движением, контроль обстановки, прицеливание и поражение цели производит машина, а человеку остаются решение тактических задач и техническое обслуживание.

Процесс роботизации затронул и такую специфическую область как обеспечение общественной безопасности: вот уже более 20 лет в арсенале спецслужб и полицейских подразделений находятся мобильные роботы и робототехнические комплексы.

До сих пор нет четкого представления о том, какую машину можно считать роботом, а какую нет. В энциклопедическом словаре роботом называется автоматическая система (машина), оснащенная датчиками, воспринимающими информацию об окружающей среде, и исполнительными механизмами, способная с помощью блока управления целенаправленно вести себя в изменяющейся обстановке. Характерной особенностью робота считается способность частично или полностью выполнять двигательные и интеллектуальные функции человека. От обычной автоматической системы (например, станка-автомата) робот отличается многоцелевым назначением, большей универсальностью, возможностью перестройки на выполнение разнообразных функций. На практике же понятие “робот” распространяют и на любые дистанционно управляемые транспортные средства, снабженные системой очувствления (как минимум, системой технического зрения).

Робот призван заменить человека в случаях, когда выполнение задачи находится за пределами человеческих возможностей либо сопряжено с чрезмерной угрозой здоровью и жизни человека, а также при недостатке профессионально подготовленного персонала для выполнения трудоемких и циклически повторяющихся задач.

Роботы можно классифицировать по:

- областям применения – производственные (промышленные), военные (боевые, обеспечивающие), исследовательские, медицинские;
- среде обитания (эксплуатации) – наземные, подземные, надводные, подводные, воздушные, космические;
- степени подвижности – стационарные, мобильные;
- типу системы управления – программные, адаптивные, интеллектуальные;
- функциональному назначению – манипуляционные, транспортные, информационные, комбинированные;
- уровню универсальности – специальные, специализированные, универсальные;

конструктивным признакам:

- типу исполнительных приводов - электрические, гидравлические, пневматические;
- типу движителя - гусеничные, колесные, колесно-гусеничные, полугусеничные, шагающие, колесно-шагающие, роторные, с петлевым, винтовым, водометным и реактивным движителями;
- конструктивным особенностям технологического оборудования - по числу манипуляторов, по грузоподъемности манипуляторов, по системе координат рабочей зоны (линейная, угловая);
- типу источников первичных управляющих сигналов - электрические, биоэлектрические, акустические;

- способу управления - автоматические, дистанционно управляемые (копирующие, командные, интерактивные, супервизорные, диалоговые), ручные (шарнирно-балансирные, экзоскелетонные).

Условия функционирования роботов, определяемые типом среды эксплуатации и характером рабочего процесса, можно разделить на две категории: детерминированные (определенные) и недетерминированные (неопределенные).

К детерминированным средам относятся среды, спроектированные и созданные человеком. Соответственно, детерминированным процессом является каждый процесс, протекание которого полностью зависит от целенаправленной деятельности человека (деятельности по непосредственному осуществлению процесса, управлению процессом и т.п.).

В детерминированных средах уже имеется высокая степень организации, либо требуемая степень организации может быть достигнута при сравнительно небольших затратах. Определенность среды обусловлена априорным знанием точного положения всех объектов, с которыми может взаимодействовать робот. Для манипуляционного робота это означает точное знание местоположения и ориентации объектов, расположенных в его рабочей зоне. Для транспортного робота детерминированной средой является, например, рельсовая трасса в цехе. К первой категории относятся также среды, которые можно организовать требуемым образом, хотя и ценой значительных затрат (не полностью организованные среды). В этом случае отдельные объекты могут иметь заранее неизвестные отклонения от эталона. К этим средам можно отнести полевые склады боеприпасов, горючесмазочных материалов, технологические позиции и т.д.

В средах второй категории практически невозможно осуществить их организацию. Такие среды называются полностью неорганизованными (недетерминированными). К ним относятся, в частности, природные среды и среды, создаваемые аварийными ситуациями как в природных условиях, так и при разрушении сред, спроектированных и созданных человеком, т.е. при разрушениях зданий и сооружений. К действиям робота в природных средах относятся действия в полевых условиях: разведка на местности, военные действия, разминирование и патрулирование, подводные и подземные работы и т.п. (в том числе в случаях радиоактивного, химического и бактериологического заражения местности). К действиям робота при разрушениях созданных человеком сред относятся ведение боевых действий в городских условиях, а также действия по расчистке завалов, спасательных работах в разрушенных сооружениях и т.п.

К недетерминированным процессам относится каждый процесс, протекание и результат которого полностью не зависит от целенаправленной деятельности человека. Недетерминированными процессами являются ведение боевых действий, все природные процессы (землетрясения, извержения вулканов и т.п.), пожары, взрывы (как результаты техногенных аварий) и т.п.

Для работ в недетерминированных условиях в настоящее время развивается особый класс робототехнических систем, называемых в технической литературе "мобильными роботами", отличительной чертой которых является наличие локомоционной способности (т.е. способности к переместительным движениям системы в пространстве).

Транспортная система представляет собой транспортное средство, предназначенное для доставки специального и технологического оборудования к месту выполнения поставленной задачи.

Транспортное средство состоит из ходовой части, корпуса и энергетической установки. Как правило, система управления устанавливается внутри корпуса. В зависимости от типа среды эксплуатации ходовая часть может быть гусеничная, колесная, колесно-гусеничная, полугусеничная, шагающая, колесно-шагающая, роторная, с петлевым, винтовым, водометным и реактивным движителями.

Облик наземного мобильного робота в первую очередь определяется типом и конструкцией движителя, служащего для преобразования в процессе взаимодействия с внешней средой усилия, получаемого от двигателя, в тяговое усилие, движущее транспортное средство.

Выбор типа движителя и его размеров является очень сложной задачей. Практически невозможно создать универсальную конструкцию движителя, дающего возможность одинаково уверенно пе-

редвигаться в разнообразных условиях окружающей среды: множество видов и свойств оснований, сложные пересечения рельефа местности, необходимость перемещения по элементам сооружений и внутри зданий являются причиной создания большого числа компоновочных схем роботов с различными типами движителей.

Основное внимание разработчиков уделяется различным вариантам колесного и гусеничного движителей. Несколько меньшее внимание уделено шагающему движителю. И существенно меньшее - другим типам (например, роторно-винтовому, аппаратам на воздушной подушке и др., предназначенным для движения по поверхности со специфическими физико-механическими свойствами - заболоченным местам, мелководью, глубокому снегу).

Для каждого типа движителя существует своя область применения. Так, в качестве движителя многофункционального мобильного робота, предназначенного для использования на труднопроходимой местности, выбирают гусеничный движитель как наиболее универсальный. При преимущественном использовании робота на дорогах более предпочтительным является колесный вариант транспортного средства. Применение шагающих машин перспективно лишь в среде, где скорость колесного или гусеничного движителя уступает скорости шагающего движителя (например, в горной местности, в очагах разрушений и т.п.). При конструировании обычных транспортных средств параметры движителя оптимизируются для наиболее характерных условий применения и поверхностей движения. Однако, для мобильного робота такая оптимизация невозможна в силу неопределенности условий движения. Поэтому в настоящее время движители роботов конструируются с возможностью адаптации к поверхности движения. В первую очередь это относится к малогабаритным роботам, предназначенным для работ внутри зданий и сооружений, в очагах разрушений, боевым и разведывательным роботам

Адаптивные движители таких роботов обладают возможностью изменения своих параметров и структуры самостоятельно или по команде системы управления на основе текущей информации об условиях движения с целью достижения определенного, обычно оптимального, состояния при начальной неопределенности и изменяющихся условиях движения.

Специальные системы служат для непосредственного выполнения поставленных задач. Специальная система состоит из необходимого набора технологического оборудования, состав которого определяется видом решаемой задачи и назначением МР.

Система управления обеспечивает управление движением и работой технологического оборудования, а также адаптивное управление ходовой частью и энергетической установкой с учетом взаимодействия транспортной системы с окружающей средой.

Система управления включает в себя информационно-управляющую часть (аппаратура управления роботом, датчики, система технического зрения и микропроцессоры предварительной обработки информации), расположенную на мобильном роботе; пост оператора мобильного робота (пульт управления, видеопросмотровые устройства; ЭВМ для обработки информации) и комплект приемо-передающей аппаратуры, обеспечивающей передачу информации от робота на пост оператора и управляющих команд от поста оператора на мобильный робот

Система управления движением должна также обеспечивать планирование движения в недетерминированных условиях на основе картографической базы с учетом непрерывно поступающей информации в систему управления от технических органов чувств и навигационной системы.

Сложность системы управления определяется сложностью решаемой задачи, степенью неопределенности внешней среды и требуемой степенью автономности робота.

Именно развитие систем управления определяет развитие робототехнических комплексов в целом, и, в частности, легло в основу классификации мобильных роботов по поколениям. В общем случае система управления содержит три уровня управления: верхний (стратегический), средний (тактический) и нижний (исполнительный), которые имеют встроенные механизмы адаптации, работающие на основе оценки качества реализации планов различного уровня в реальном физическом мире. Организация взаимодействия уровней управления должна позволять принимать решение на

том уровне, который в данный момент обладает наиболее достоверной информацией, без передачи управления на более высокий уровень.

Человек (оператор) является в настоящее время неотъемлемой частью системы управления. Функции человека в системе управления определяют ее сложность. В роботах первого поколения оператор активно участвует в управлении мобильным роботом на всех трех уровнях, вплоть до непрерывного ручного управления исполнительными механизмами. Это упрощает конструкцию системы управления, но усложняет работу оператора. В режиме дистанционного управления распознавание дорожных сцен, планирование маршрута и формирование команд управления осуществляется оператором, находящимся на стационарном или подвижном пульте управления. Основные недостатки дистанционного управления обусловлены наличием телевизионного и радио каналов связи, их невысокой помехозащищенностью, невозможностью сохранять режим радиомолчания, опасностью неожиданного прекращения связи в зонах радиотени.

В роботах второго поколения управление нижнего уровня возложено на бортовую систему управления роботом. Общим для роботов второго поколения является использование обратной связи как в соответствии с текущим состоянием робота, так и в соответствии с состоянием внешней среды.

Третье поколение роботов оставляет человеку только стратегический уровень: система общения с оператором сводится к выдаче задания и принятию отчета о его выполнении. Платить за облегчение жизни оператора приходится весьма дорого: автоматическая система должна обладать универсальностью, гибкостью и широтой возможностей естественного интеллекта. При этом любая решаемая системой искусственного интеллекта дополнительная задача, а тем более класс задач или ситуаций, требует не только разработки специальных алгоритмов решения, но и специализированных технических средств - новых технических органов чувств, спецвычислителей и исполнительных органов, т.е. каждая такая задача представляет собой сложную научно-технологическую проблему.

В настоящее время наиболее целесообразной представляется разработка комбинированных систем с возможностями автоматического и дистанционного супервизорного управления. Например, "захват" дороги и выход на нее осуществляет человек, а движение по дороге - автоводитель, поиск ориентиров на местности и их идентификацию - человек, вычисление местоположения робота - бортовая система управления. Исключение человека из процесса непосредственного управления резко сокращает объем передаваемой через эфир информации, а возможность его вмешательства в сложных ситуациях расширяет круг решаемых задач. Кроме того, автоматическая система обеспечивает продолжение выполнения задания или эвакуацию робота из опасной зоны при нарушении связи из-за применения средств радиоподавления или отказа радиооборудования.

Применение мобильного робота более эффективно при использовании последнего в составе робототехнического комплекса, образованного группой мобильных роботов, средствами доставки, энергообеспечения и технического обслуживания, центральным постом управления и обработки данных.

Мобильные роботы универсальны и поэтому могут быть использованы в разных областях. Применительно к использованию робототехники в военных целях и в чрезвычайных ситуациях приоритетное значение имеют технические "способности" роботов, пригодность к эксплуатации в жестких и экстремальных условиях и способность обеспечить защиту обслуживающего персонала. При использовании роботов в гражданской промышленности наибольшее значение придается их экономической эффективности.

Основные тактические задачи, решаемые с помощью мобильных роботов  
В той или иной степени применение мобильных роботов в интересах спецслужб и полицейских подразделений возможно при проведении операции любого типа. Однако наиболее целесообразно использование роботов при проведении взрывотехнических работ и антитеррористических операций, а также при охране важных объектов.

При этом применение роботов возможно для решения следующих тактических задач:

- при проведении взрывотехнических работ

- поиск и диагностика взрывных устройств
- уничтожение или эвакуация взрывных устройств
- расснаряжение или обезвреживание взрывных устройств
- проведение химической и радиационной разведки объектов и территорий
- при проведении антитеррористических операций
- постановка радиоэлектронных помех, дымовых и специальных завес
- доставка и применение спецсредств нелетального действия
- скрытое проникновение на захваченные и охраняемые объекты
- ведение радиоэлектронной аудио- и видеоразведки объектов и территорий
- разрушение преград (двери, стены)
- ведение отвлекающего огня, выявление огневых точек противника
- при охране объектов
- патрулирование территории или периметра объекта
- пресечение попыток проникновения на объект
- нейтрализация нарушителей.
- Указанные операции проводятся на разных объектах и в разнообразных условиях:
- на объектах общественного транспорта (городской транспорт, железнодорожный, авиационный, морской, автомобильный);
- в местах проживания и жизнедеятельности людей (квартиры, дома, офисы и др.);
- на промышленных объектах (объекты химической промышленности, ядерного технологического цикла и пр.);
- на объектах городской инфраструктуры (канализация, теплостанции, водопровод и т.п.);
- на открытой местности, на сильно пересеченной местности, в лесах и т.д.

Специфика операций, условия эксплуатации и функциональное назначение мобильного робота определяют его конструктивные особенности, степень сложности системы управления, массогабаритные характеристики и состав специального оборудования.

К мобильному роботу предъявляются следующие общие требования:

- робот должен иметь высокие подвижность и проходимость в городских условиях, внутри зданий и сооружений, в зонах разрушений, на пересеченной местности, как на твердых гладких покрытиях, так и на деформируемых грунтовых основаниях;
- робот должен надежно действовать как в неподготовленных естественных условиях, так и в среде, специально приспособленной для обитания человека (внутри домов, в транспортных коммуникациях), вписываться в городские транспортные потоки или двигаться в составе транспортных колонн;
- конструкция робота должна обеспечивать его высокую мобильность и быстрое развертывание при выполнении спецопераций.

Для выполнения вышеуказанных задач спецподразделения имеют следующие основные группы мобильных роботов:

- Мобильный Робототехнический Комплекс (МРК) — универсальные наземные роботы, предназначенные для действий на объектах транспорта, промышленности, городской инфраструктуры и т.д., на открытой слабопересеченной местности;
- Специальные Робототехнические Комплексы-роботы, способные перемещаться по вертикальным и наклонным поверхностям промышленных объектов и транспортных средств, а также в трубопроводах и узких местах;
- Малогабаритный Дистанционно Пилотируемый Летательный Аппарат (МДПЛА) — воздушный робот для проведения разведки на открытой местности, сильно пересеченной местности, в горах, в городе.
- Мобильные робототехнические комплексы

- Мобильные робототехнические комплексы применяются при:
- боевом обеспечении спецопераций (заградительный огонь, разведка боем, разрушение заграждений и т. п.)
- проведении разведки;
- проведении взрывотехнических работ (поиск, извлечение, транспортирование и обезвреживание или уничтожение взрывоопасных предметов и неразорвавшихся боеприпасов; взрывные работы);
- обеспечении безопасности важных объектов.
- По массе (и, следовательно, мобильности) и основному назначению МРК можно разделить на 4 группы:
- сверхлегкие, массой до 35 кг (рис. 3.6);
- легкие, массой до 150 кг;
- средние, массой до 800 кг;
- тяжелые, массой свыше 800 кг.



Рис 4.5 Сверхлегкий мобильный робот МРК-01 (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Предназначен для проведения инспекционных проверок, поиска и уничтожения взрывоопасных предметов. Является базовым образцом для семейства малогабаритных роботов.

Изначально заложенный в конструкцию большинства роботов модульный принцип позволяет создавать многофункциональные комплексы, используя единую транспортную систему в качестве базовой и формируя рабочую систему при установке сменного вооружения или рабочего оборудования и требуемой системы управления.

Для роботов массой до 800 кг разрабатываются оригинальные специализированные транспортные модули. Более тяжелые робототехнические системы используют в качестве базовых шасси, серийно выпускаемые образцы военной и гражданской транспортной техники (рис. 3.7).

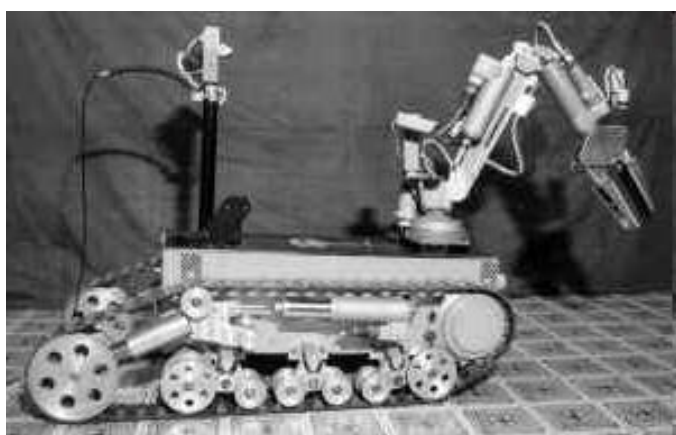


Рис. 4.6

Мобильный робототехнический комплекс МРК-25 (МГТУ им. Н.Э. Баумана) имеет конвертируемую ходовую часть. Складывание гусеничного обвода дает возможность роботу маневрировать в стесненных условиях (например, разворачиваться на лестничных площадках) и обеспечивает перевозку робота в джипе или микроавтобусе.

Транспортное средство роботизированной системы разминирования ETODS (ОАО, США) выполнено на базе погрузчика типа “Bobcat”.

Конструктивно универсальные мобильные роботы представляют собой малогабаритные самоходные средства, оснащаемые разведывательной аппаратурой, набором сменного рабочего оборудования и инструмента. Рассчитаны на дистанционное управление оператором, ведущим на-



блюдение непосредственно или с помощью телевизионной камеры. В состав установленных на роботах комплексов приборов и оборудования входят:



Рис. 4.7 Транспортное средство роботизированной системы разминирования

- телевизионная аппаратура (на современных образцах, как правило, цветного изображения), включающая телевизионные камеры (до четырех единиц) и портативные мониторы, по которым оператор ведет наблюдение за местностью и управляет работой машины;
- осветительные средства (прожекторы) для подсветки при действиях в темное время суток и низких уровнях освещенности;
- манипуляторы для захвата, перемещения и транспортирования объектов;
- портативная рентгеновская аппаратура для обследования на месте обнаруживаемого объекта и определения степени его опасности;
- оборудование для уничтожения на месте взрывоопасных предметов (наибольшее распространение получили гидродинамические разрушители, используемые для уничтожения самодельных взрывных устройств в неметаллических оболочках, ацетиленовые горелки для сжигания неметаллических мин и гладкоствольные ружья для стрельбы тяжелыми пулями-болванками);
- набор инструмента для разборки, отделения или вывода из строя отдельных компонентов обнаруженного боеприпаса в целях его нейтрализации;
- набор стетоскопов для прослушивания работы часовых механизмов взрывателей замедленного действия, а также зеркал для обследования отдельных компонентов подозрительного объекта, расположенных в труднодоступных местах.

Сами машины выполняются на шасси из алюминиевых сплавов и легированной стали с колесной, гусеничной или сменной (быстро заменяемой с колесной на гусеничную и обратно) ходовой частью.



Рис.4.8 . Мобильный робот Castor (GIAT Industries, Франция) может иметь либо колесную, либо гусеничную ходовую часть.

*Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов*

На шасси смонтирован полноповоротный (как правило) манипулятор, приспособленный для установки сменного рабочего оборудования, аппаратуры или инструмента. В качестве энергетической установки чаще всего служат

электрические аккумуляторы, их емкости обычно достаточно для работы в течение нескольких часов, однако возможно применение двигателя внутреннего сгорания или питание от внешнего источника электроэнергии. При использовании аккумуляторов привод ходовой части машины и рабочего оборудования обычно электромеханический, а двигателя внутреннего сгорания – гидравлический. Дистанционное управление работой машин осуществляется по радио (на дальности до

4000 м), по волоконно-оптической линии связи (на расстоянии до 400 м), либо по кабелю. (на расстоянии до 100 м).

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефти и газопроводов, для водопроводных и канализационных сетей (особенно для крупных городов и мегаполисов как Москва), для каналов водосброса и водозабора из рек. Применение мобильных роботов для телеинспекции и обслуживания магистралей позволяет предупреждать техногенные и экологические аварии и катастрофы (а не подсчитывать многомиллионный ущерб и описывать безвозвратные утраты в природе, чем зачастую заняты экологические службы) и внедрить бестраншейные методы ремонта. Роботизация позволяет также осуществлять реновацию и санацию ветхих магистралей, проводить приемку новых и контроль за состоянием действующих трубопроводов, проводить экологический мониторинг сетей, составлять карты подземных коммуникаций.

Ведущим отечественным разработчиком инспекционных роботов для водопроводных и канализационных сетей является московское НПО "ТАРИС". Выпускаемые предприятием с 1991 года роботы достойно конкурируют с зарубежными системами. При равном уровне качества цена мобильных роботов фирмы "ТАРИС" на 15-20% ниже импортных аналогов, при этом очевидны выгоды в гарантийном и сервисном обслуживании техники на территории России и СНГ. По имеющимся оценкам годовой экономический эффект от применения инспекционных роботов приблизительно в два раза превосходит их стоимость.



Рисунок 4.9 Внешний вид мобильного робота

Для этой конструкции имеется реальный робот фирмы "ТАРИС" показан на рис.1. Осмотровый робот Р-200 предназначен для телеинспекции трубопроводов диаметром от 150 до 1200 мм. Этот мобильный робот имеет набор сменных колес и цветную поворотную телекамеру. Управляется робот дистанционно оператором с поста управления, размещенного в автомобиле (длина кабеля до 200 м). Пост управления имеет цветной монитор и цифровую систему документирования на базе компьютера в промышленном исполнении. Телекамера оснащена устройством наведения (механизмы качания, ротации и подъема) для осмотра стенок трубы, блоками основного и дополнительного освещения, электромеханический стеклоочиститель, а также имеет дистанционный привод фокусировки.

Робот имеет герметичное исполнение, способен работать с погружением в воду, корпус накачивается азотом для предотвращения конденсации влаги внутри него и запотевания стекол телекамеры. Приводы перемещения представляют собой мехатронные модули типа "мотор-колесо" на базе двигателей постоянного тока. Схема телеинспекции показана на рис.4.10, а. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиком пути, датчиком углов крена и дифференциала корпуса, датчиками углов ориентации телекамеры. Эти сенсоры необходимы не только для управления движением робота, но и для трассировки залегания трубопровода, дают информацию о профиле трубы и координатах дефекта (свища, трещины) или обнаруженного постороннего предмета

Телероботы НПО "ТАРИС" позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Робот РОКОТ-1М комплектуется сменными рабочими органами - фрезерными и бандажными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Фрезерная головка предназначена для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывы, грат на сварных птах, штыри), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком. Заделка дефектов выполняется с помощью бандажной головки, которая накладывает кольцевой бандаж шириной 100 мм из ткани со специальной пропиткой. Схемы ремонта дефекта в трубопроводе для ликвидации утечек без раскопки показаны на рис.4.10, б-ж.

Мобильный робот является характерной мехатронной системой, когда проектно-конструкторские решения по разработке электромеханической, сенсорной и электрической частей необходимо принимать только во взаимосвязи, учитывая уже с начальных этапов главный лимитирующий фактор - диаметр трубопровода.

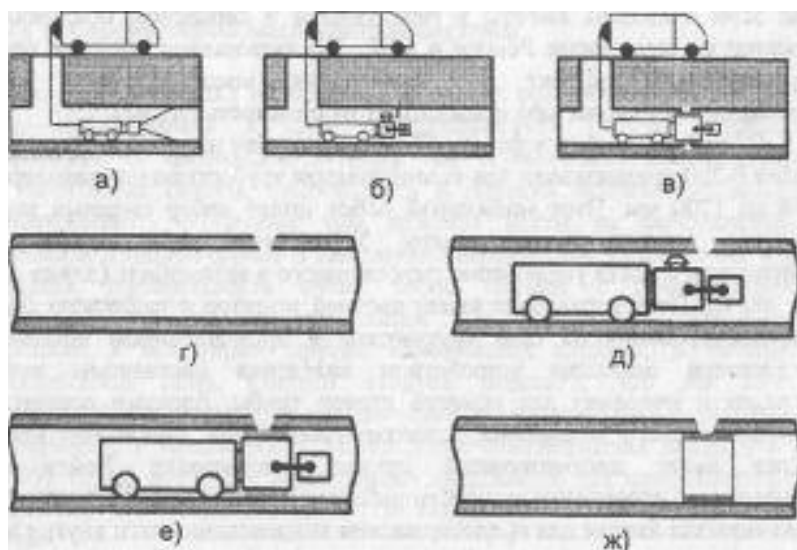


Рисунок 4.10 Схемы роботизированных операций:

а) телеинспекция трубопровода; б) подрезка выступающих элементов; в) локальная заделка дефекта; г) дефект в трубопроводе; д) зачистка с помощью фрезерной головки; е) установка внутреннего бандажа; ж) трубопровод после ремонта.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, что позволит повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения. Автоматическое принятие решений роботом, без непосредственного участия человека - оператора, целесообразно на следующих операциях:

- обнаружение и распознавание постороннего объекта в трубопроводе с использованием информации системы технического зрения (СТЗ) и локационных датчиков;
- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сенсорных сигналов от двухкомпонентного датчика крена-дифференциала и датчиков приводных модулей "мотор-колесо";
- управление режимами работы фрезерной головки на основании информации о действующих силах и моментах;
- диагностика и измерение толщины стенки трубы.

### 3.7 Медицинские роботы

Последнее десятилетие отмечено бурным развитием высоких медицинских технологий, формирующих облик медицины 21 века. Во многих развитых странах активно ведутся разработки различных мехатронных устройств медицинского назначения. Основные направления развития медицинской мехатроники – разработка систем для реабилитации инвалидов, выполнения сервисных операций, а также для клинического применения. Основные направления развития медицинской мехатроники представлены на рис. 312.

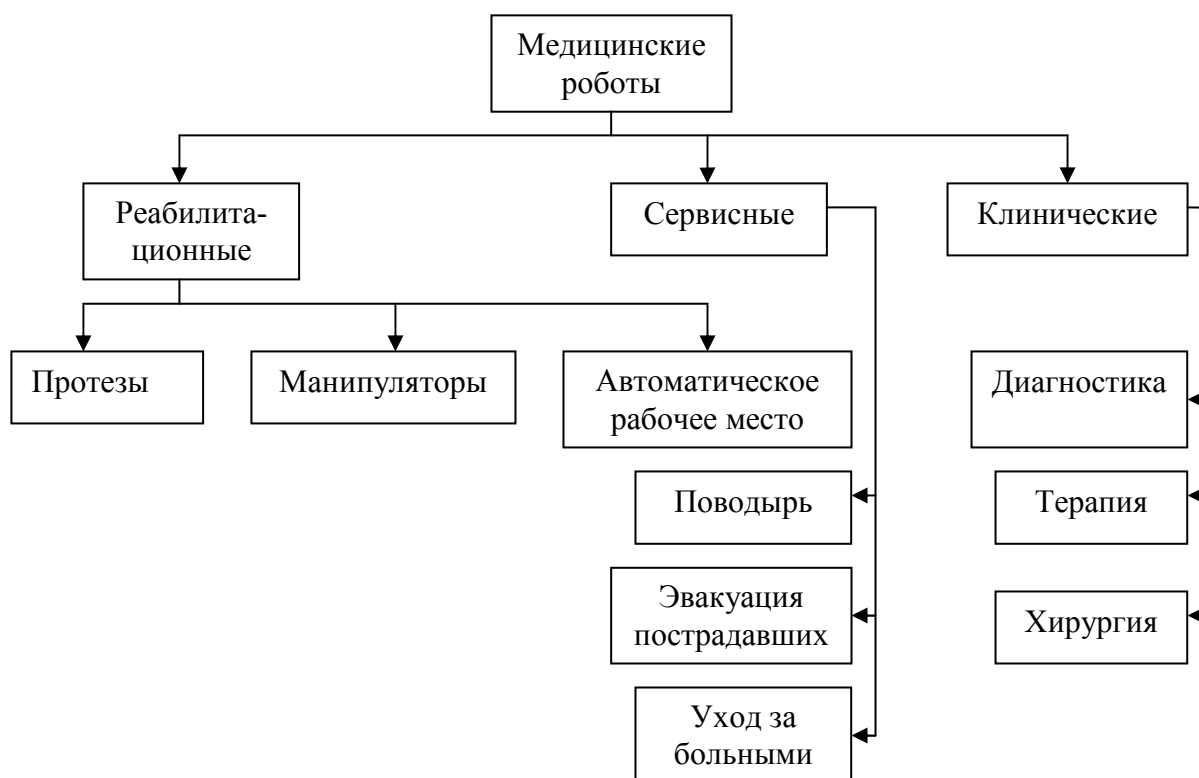


Рисунок 4.11. Основные направления развития медицинской мехатроники.

Все большую роль играют микророботы, способные самостоятельно функционировать внутри человеческого организма. Отметим, что медицинские робототехнические системы являются медицинскими по своей сути, объединяя в единое целое механические и электронные компоненты, функционирующие в составе интеллектуальной робототехнической системы. ниже рассмотрены основные достижения в области медицинской мехатроники и намечены перспективы ее дальнейшего развития.

#### *Роботы для реабилитации инвалидов.*

Медицинские роботы реабилитации предназначены главным образом для решения двух задач: восстановления функций утраченных конечностей и жизнеобеспечения инвалидов, прикованных к постели (с нарушениями зрения, опорно-двигательного аппарата и другими тяжелыми заболеваниями).

История протезирования насчитывает не одно столетие, но к мехатронике непосредственное отношение имеют лишь так называемые протезы с усилением. Современные автоматизированные протезы не нашли широкого применения из-за конструктивных и эксплуатационных несовершенств и малой надежности в работе. Но уже сейчас делается многое, чтобы улучшить их характеристики за счет внедрения в их конструкцию новых материалов и элементов, таких, как пленочные тензодатчики для управления силой сжатия пальцев руки-протеза, электронно-оптические

датчики, монтируемые в оправе очков для управления протезом руки с помощью глаз пациента и т.п.

В Японии разработана механическая рука, исполнительный орган которой имеет шесть степеней свободы и систему управления протезом. В Оксфорде (Великобритания) создана система управления для манипуляторов, предназначенных для протезирования, особенностью которых является способность выполнения заданий заранее не запрограммированных. Они обеспечивают обработку сенсорной информации, включая систему распознавания речи. Одной из проблем является формирование управляющих сигналов пациентом без помощи конечностей. Известны устройства для помощи пациентам с двумя или четырьмя ампутированными или парализованными конечностями, приводимые в движение с помощью электрического сигнала, возникающими в результате сокращения мышц головы или туловища. Разработана конструкция механической руки с телесистемой, управление которой осуществляется датчиками на голове больного, реагирующими на движение головы или бровей и подающими сигналы микропроцессору, управляющему исполнительным органом манипулятора.

Для решения задач жизнеобеспечения неподвижных больных созданы различные варианты роботизированных систем. Качественно новым конструктивным решением является антропоморфная рука – манипулятор, смонтированная на инвалидной коляске и управляемая ЭВМ. Данная система позволяет больному с минимальным уровнем подготовки управлять рукой - манипулятором для удовлетворения физиологических потребностей, пользования телефоном и т.д. Известны медицинские роботизированные комплексы, функционирование которых осуществляется через центральный контрольный пост или с помощью различных командных устройств, задание для которых пациент формирует с помощью речевых команд. Система включает в себя антропоморфную руку - манипулятор, управляющую аппаратуру, командное устройство, телевизионный монитор, а также автоматизированную транспортную тележку. По желанию больного включаются телевизор, радио, осветительные приборы, изменяется положение больного на кровати, приводится в действие манипулятор.

Важной проблемой, связанной с реабилитацией инвалидов, является создание для них рабочих мест. В Великобритании разработано автоматизированное рабочее место для инвалидов с нарушениями опорно-двигательной системы. Робот представляет собой манипуляционную систему, которая управляет речевыми командами оператора; он способен по желанию пациента выбирать музыкальные диски, книги, переворачивать листы читаемой книги, переключать периферийные устройства компьютера, набирать номера телефонов.

В США было разработано автоматизированное рабочее место с антропоморфной рукой – манипулятором для инвалидов, страдающих тяжелой формой нарушения опорно-двигательной системы. Пациент с минимальным уровнем подготовки может управлять роботом, предназначенным для приема пищи, питья, ухода за волосами, чистки зубов, чтения, пользования телефоном, а также для работы на персональном компьютере. Контроллер, размещенный под подбородком пациента, для управления автоматизированным рабочим местом может монтироваться на инвалидной коляске или на столе рабочего места. Это делает, в частности, возможным использование большого числа автоматизированных рабочих мест для одновременного кормления группы пациентов. Такие мероприятия обеспечивают пациентам возможность общения друг с другом и способствуют их осознанию себя как полноправного члена общества.

#### *Сервисные роботы.*

Медицинские роботы сервисного назначения призваны решать транспортные задачи по перемещению пациентов, различных предметов, связанных с их обслуживанием и лечением, а также выполнять необходимые действия по уходу за больными, прикованными к постели.

Внедрение в систему здравоохранения роботов этой группы позволит освободить медперсонал от рутинной вспомогательной работы, предоставив ему возможность заниматься своими профессиональными делами.

Разработан робот, выполняющий функции, связанные с приложением больших усилий – транспортировка, укладывание больных и т.п. Робот представляет собой электрогидравлическую систему с автономным источником питания. Возможность управлять роботом предоставляется как пациенту, так и мед персоналу. Он оснащен сенсорной системой. Робот способен обслуживать больного, масса которого не превышает 80 кг.

В Великобритании разрабатывается роботизированное устройство, способное выполнять операции по переворачиванию лежачих тяжелобольных с целью устранения у них пролежней. В результате появляется возможность устранить вынужденные потери и освободить медсестер от выполнения этой изнурительной работы. Такие устройства позволяют, в частности, одному медработнику мыть в ванне тяжелобольных, не прибегая к помощи других сотрудников.

В Японии разработан образец мобильного робота – поводыря Meldog для слепых, представляющий собой небольшую транспортную четырехколесную полноприводную тележку, система управления которой оснащена системой технического зрения и ЭВМ. В память ЭВМ записан маршрут движения в пределах данного населенного пункта. Одни датчики робота по месторасположению стен домов и выбранных опорных точек идентифицируют уличные перекрестки, другие обнаруживают дорожные препятствия. По сигналам с датчиков бортовая ЭВМ робота вырабатывает стратегию преодоления препятствий. Робот – поводырь управляет движением слепого пациента с помощью элементов связи, которые расположены на мягком прилегающем к телу инвалида поясе. Электрические импульсы, генерируемые этим поясом, являются командами для пациента при остановке робота или его повороте налево или направо. Робот контролирует скорость своего передвижения и останавливается в 1..2 м впереди ведомого слепого пациента. В перспективе появление подобных мобильных роботов с улучшенной системой управления, основанной на принципах вероятностной логики.

Внедрение транспортных мобильных роботов в инфраструктуру медицинских учреждений России значительно облегчит решение вопроса о нехватке младшего медицинского персонала. Основными видами транспортировочных работ, которые предполагается поручать медицинским мобильным роботам, является: централизованная доставка медицинских материалов и оборудования, лотков и поддонов с пищей для пациентов, лабораторных анализов, готовых медикаментов, почты для больных, а также утилизация и транспортировка материалов и отходов из служебных помещений.

В США разработан транспортный мобильный робот для госпиталей. В госпитале г. Данбэри этот робот в автономном режиме управления развозит лотки с пищей. Госпиталь насчитывает 450 коек для больных. Ежедневно робот развозит около 90 поддонов или лотков с пищей для вновь прибывших пациентов.

Медицинский робот Helpmate оснащен системой технического зрения, состоящей из нескольких цветных ТВ – камер, акустических локаторов и неконтактных НК – датчиков для обнаружения дорожных препятствий, измерения расстояния до них и составления маршрута безопасного движения. На передней стенке робота расположены также электровыключатель экстренной остановки (продублированный на задней стенке), сигнальная лампа – вспышка и сигналы поворота.

На заднюю стенку робота выведены устройства считывания карты местности: клавишная панель, переключатель вида работ, шкаф для лотков с пищей и ниша для аккумуляторов.

Стратегия преодоления препятствий решается с помощью бортовой ЭВМ на базе составленной карты местности. Данные, полученные с датчиков первичной информации, логически обрабатываются и выводятся на карту местности. Датчики сканируют местность спереди передвигающегося робота, так что в случае появления препятствия робот по сигналам с датчиков останавливается. В течение нескольких минут ЭВМ обрабатывает данные и подтверждает наличие преграды. Если препятствие движется, то робот ожидает до тех пор, пока оно не исчезнет. Если же объект стоит неподвижно, то робот начинает маневрировать в целях обхода препятствия сбоку. Все процессы маневрирования записываются в память машины. В случае неудачи все записанные параметры маневрирования сравниваются с истинным положением робота и проводится коррек-

тировка программы и системы управления. Время обучения мобильного робота передвижению в автономном режиме зависит от сложности маршрута, размеров коридоров и дверных проёмов в больнице.

Помимо робота Helpmate в США разработана госпитальная роботизированная система Robotek упрощенной конструкции и меньшей стоимости.

В Канаде ведутся исследования по созданию медицинского мобильного робота автономного управления с высокими тактико-техническими характеристиками. В целях обеспечения высокой функциональной надежности система управления робота оснащена резервной системой управления, а также системой самодиагностики, способной в автоматическом режиме определять отказы в системе управления и их причины.

В Японии для транспортировки лежачих больных в пределах госпиталя разрабатывается медицинская мобильная робототехническая система, представляющая собой дистанционно управляемую транспортную тележку. Робот оснащен устройством для перекладки больного с больничной койки на транспортировочное средство, состоящей из доски с крепежными мягкими ремнями сверху и внизу. Это подвижное устройство может перемещаться между пациентом и его коечным матрасом и позволяет самому больному передвигаться на доске, которая подвешивается на роботе в двух местах, позволяющих ей принимать конфигурацию кресла.

По мнению экспертов Japan Industrial Robot Association (JIRA), японский рынок госпитальных мобильных роботов возрос с 1000 в 1995 году до 3200 в 2000 г.

За последние годы повысился интерес к мобильным госпитальным роботам и в ряде европейских стран. Во Франции и Италии ряд ведущих робототехнических и электронных компаний включились в разработку роботизированных систем для транспортировки продуктов, как в госпитале, так и в офисе. Ведутся работы по созданию роботов для эвакуации раненых из зон природных и техногенных катастроф.

#### *Клинические роботы.*

Клинические роботы предназначены для решения трех главных задач: диагностики заболеваний, терапевтического и хирургического лечения.

Ряд существующих диагностических систем с изображением на экране исследуемой области (например томографический прибор, управляемый от ЭВМ), уже использует элементы механики и робототехники. Предполагается, что массовое появление медицинских приборов различного назначения, управляемых ЭВМ, окажет сильное влияние на врачебную практику.

В Японии запатентован микроманипулятор, предназначенный для проведения медицинских и биологических исследований на клеточном уровне, позволяющий измерять электрическое сопротивление клетки, делать микроинъекции в клетку медицинских препаратов и ферментов, менять конструкцию клетки и извлекать ее содержимое.

Другой областью применения роботов является радиотерапия, где они используются в целях понижения уровня радиационной опасности для медицинского персонала. Использование роботов считается наиболее целесообразным при проведении замены нескольких дорогостоящих стационарных радиоактивных источников во многолучевых установках. Разработка манипуляторов для радиотерапевтических отделений находится в экспериментальной фазе. На этой же фазе находятся работы по созданию робота – массажера.

Существует ряд сложных хирургических операций, выполнение которых сдерживается отсутствием опытных хирургов, поскольку такие операции требуют высокой точности исполнения. Например, в микрохирургии глаза существует такая операция, как радиальные разрезы роговой оболочки (radial keratotomy), с помощью которой можно корректировать фокусное расстояние глаза при устранении близорукости. Идеальная глубина надреза оболочки глаза должна не превышать 20 мкм. Опытный хирург при проведении этой операции может выполнять надрезы на глубину 100 мкм. В Канаде разрабатывается медицинский робототехнический комплекс, способный делать высокоточные надрезы на глазной роговице и обеспечивать нужную кривизну глаза. Другим при-



мером исполнения хирургических операций высокой точности является микронейрохирургия. В Великобритании уже разработан медицинский робот для микрохирургии мозга.

Созданный в США медицинский робот с манипулятором «Пума» продемонстрировал возможность извлечения кусочка ткани головного мозга для проведения биопсии. С помощью специального сканирующего устройства с трёхмерной системой отображения информации определялись место и скорость ввода двухмиллиметрового сверла для забора образцов мозговой ткани.

Во Франции разрабатывается медицинский робот – ассистент для оказания помощи при проведении хирургических операций на позвоночнике, когда любая ошибка хирурга может привести к полной парализации пациента. В Японии созданный медицинский робот продемонстрировал возможность трансплантации роговицы глаза, взятой у мертвого донора.

К достоинствам медицинских роботов относится их способность воспроизводить требуемую последовательность сложных движений исполнительных инструментов. В Великобритании продемонстрирован медицинский робот – тренажер для обучения врачей и моделирования процессов хирургических операций на простате, в ходе которых производится серия сложных надрезов в различных направлениях, последовательность исполнения которых трудна для запоминания и выполнения.

В США запатентована роботизированная система для помощи хирургу при выполнении операций на костях. Данная система применяется в ортопедических операциях, при которых важнейшим является точное позиционирование инструмента относительно коленного сустава. Роботизированная система состоит из операционного стола, неподвижного устройства, робота, контроллера и супервизора. Пациент размещен так, чтобы бедро было неподвижно закреплено внутри устройства. Другое бедро пациента закреплено к операционному столу ремнями.

Основание робота прочно закрепляется на операционном столе. Инструмент устанавливается на роботе, манипулятор которого может перемещаться имея 6 степеней подвижности. Манипулятор содержит позиционно – сенсорное устройство для выработки сигналов, указывающих положение манипулятора относительно координатной системы. В составе робота используется серийный манипулятор PUMA 200, который благодаря своей относительной простоте легко адаптируется к хирургическим операциям. Контроллер отслеживает все движения робота и передает их на супервизор. Команды на перемещения и управление вспомогательными операциями, вырабатываемые контроллером, передаются роботу сигналами позиционирования, поступающими по соединительным кабелям.

Существует несколько способов управления движением робота. При изготовлении робот оснащается дополнительным устройством с учебной программой. Устройство для обучения представляет собой прибор с полуавтоматическим управлением маневрированием робота. Маневрирование состоит из серии отдельных шагов – перемещений. Контроллер записывает эти шаги так, чтобы робот мог затем сам повторить их. Для управления роботом могут применяться речевые команды или другой тип управления. Робот может перемещаться и пассивным образом, для чего в манипуляторе предусмотрено ручное управление движением.

Супервизор, так же как и контроллер, обеспечивается управляющими командами и программами на языке VAL – 11. При работе с супервизором все команды на движение проходят через контроллер. Перед дисплеем устанавливается специальный экран, известный под торговой маркой «Touch window» (TSW), который используется в качестве прибора для ввода команд в процессе операции. Все изменения на кости отображаются на экране монитора. В операционной этот экран покрывается стерильной пленкой, что позволяет хирургу непосредственно управлять хирургическим операционным процессом. Программы операций базируются на геометрических соотношениях между параметрами протеза, параметрами костных разрезов и осями сверления отверстий. Робот будет перемещать инструмент по определенным позициям в соответствующих плоскостях. Началом системы координат будет некоторая фиксированная точка на опорной поверхности.

В последние годы в области автоматизации хирургических процессов появились сообщения о попытках создания роботизированных систем для дистанционной хирургии с помощью телевизионных установок, когда хирург и пациент разделены большими расстояниями.

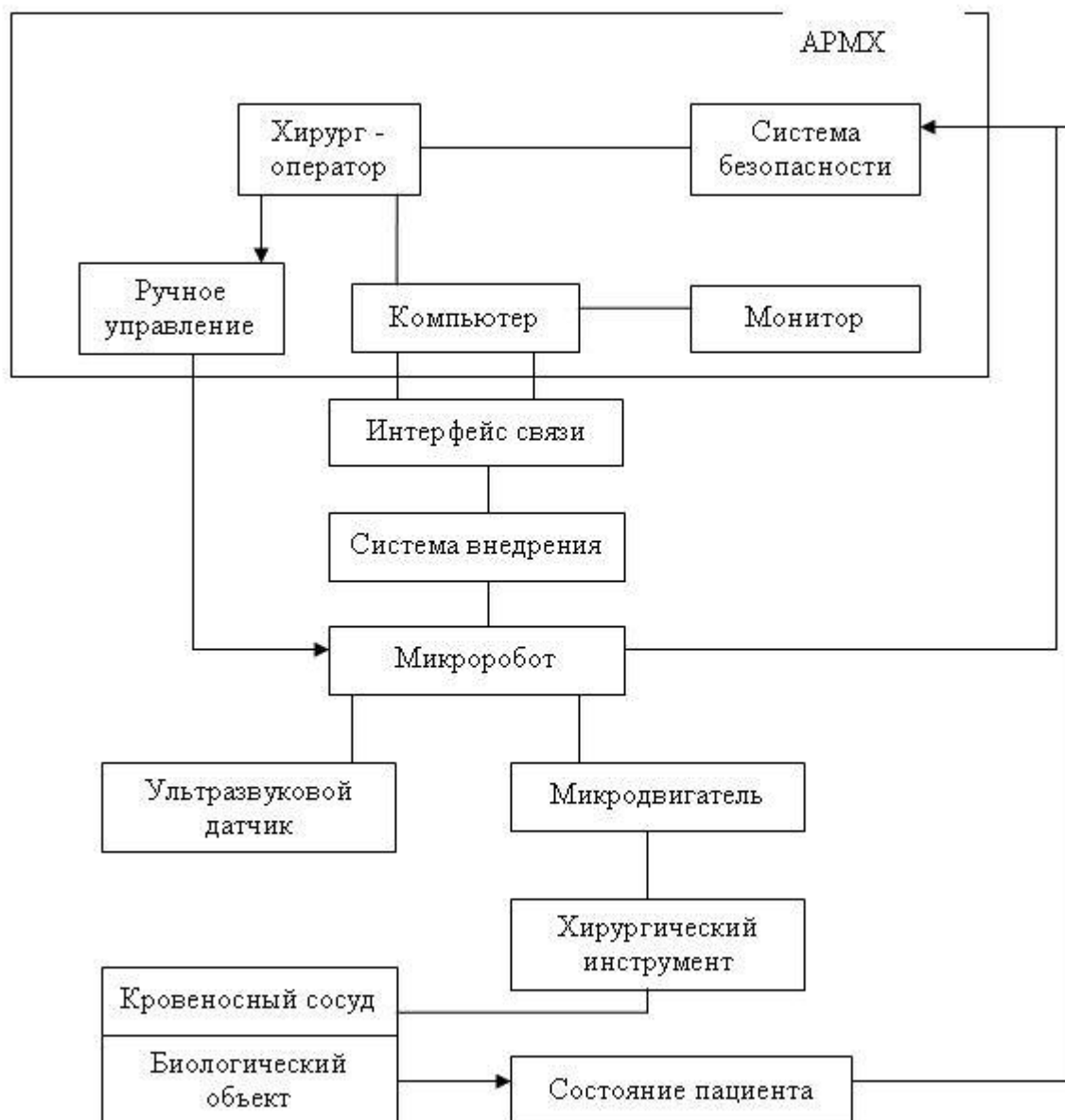


Рисунок 4.12. Функциональная схема робототехнической системы для внутрисосудистой диагностики и хирургии

К числу наиболее актуальных задач относится диагностика и хирургия сосудистых заболеваний. В Японии, Италии, России ведутся работы по созданию мобильных микророботов, предназначенных для разрушения атеросклеротических отложений в кровеносных сосудах. Предполагается, что мобильные микророботы будут работать в автоматическом режиме, перемещаясь по анатомическому руслу кровеносной системы.

В настоящее время в МГТУ им. Н.Э. Баумана ведутся работы по созданию роботизированной системы, позволяющей решать эти задачи. Система включает артериальный носитель – микроробот, способный перемещаться по кровеносному руслу и оснащенный ультразвуковым микродатчиком, а также необходимым рабочим инструментом. Функциональная схема этой системы приведена на рис.2. Хирург – оператор, получая информацию о состоянии сосуда, имеет возмож-

ность с помощью микроробота осуществлять процедуры как медикаментозного, так и хирургического характера.

В Канаде проводятся экспериментальные исследования телеоператора – робота для лапароскопических операций. Новая медицинская технология основана на применении миниатюрной камеры и специальных инструментов, вводимых через брюшную стенку. Видеоизображение передается на монитор, и ассистент координирует движения оперирующей группы в заданном направлении. Положение миниатюрной видеокамеры в брюшной полости координируется с помощью манипулятора, управляемого хирургом.

Отметим, что клинические робототехнические системы являются эргатическими т.е. функционируют при участии оператора. Высокий уровень технологий позволяет существенно расширить возможности оперативного вмешательства. Примером может служить дистанционно управляемая манипуляционная система для проведения операций на сердце. В последнем случае хирург получает возможность проводить операции с разрешением, в 2-3 раза меньшим, чем позволяет его рука при непосредственной работе с инструментом. Следует подчеркнуть, что подобного рода операции возможны только при достаточно высоком уровне информационных технологий, использовании активного интерфейса и экспертных систем, обеспечивающих диалог хирурга с робототехнической системой на протяжении всей операции, контролирующих его действия и предотвращающих возможные ошибки.

Наряду с непосредственным управлением движением мини – манипуляторами и микророботами с помощью органов ручного управления хирург имеет возможность использовать речевые команды для управления как рабочим инструментом, так и средствами информационного обеспечения. Таким образом, использование клинических робототехнических систем позволяет не только отказаться в ряде случаев от традиционных медицинских технологий, но и существенно облегчить условия труда хирурга и врача – диагноста.

### **Заключение.**

Медицинская мехатроника находится в состоянии быстрого подъема, темпы которого значительно выше, чем в традиционных областях мехатроники. Вместе с тем необходимо упомянуть и о факторах, сдерживающих применение мехатронных устройств в медицинской практике, которые справедливы не только для России, но и для всех развитых стран. Важнейшим среди них является психологический фактор, связанный с дегуманизацией медицинского обслуживания и проявляющийся не только со стороны пациентов, но и со стороны медицинского персонала. Этот фактор вызывает отторжение идеи применения мехатроники для столь деликатной сферы, как организм человека. Его преодоление требует отношения к мехатронике, в первую очередь, как к средству, инструменту медицинской практики врача, хирурга. Необходимо обратить внимание на обеспечение надежности мехатронных систем и их безопасность для пациента.

Другим сдерживающим фактором является разобщенность и неполное взаимное понимание специалистов в области техники и медицины. Это обстоятельство требует подготовки специалистов нового типа, владеющих не только инженерными знаниями, но и хорошо знакомыми с особенностями медицинских технологий. Необходимо обратить внимание на тот факт, что в настоящее время еще не сложилась в полной мере биотехническая методология, предусматривающая системный подход к проектированию мехатронных медицинских систем.

Наиболее трудноразрешимая задача, возникающая при проектировании медицинских мехатронных систем, заключается в согласовании между собой отдельных элементов системы. При этом можно выделить следующие условия совместимости:

- биофизическая совместимость характеристик биологического объекта и технических элементов мехатронной системы;
- информационная совместимость мехатронной системы и оператора системы;
- эргономическая совместимость мехатронной системы по отношению как к оператору, так и к пациенту;
- психологическая совместимость технической части системы с оператором и пациентом.

- Соблюдение этих условий позволит уже в ближайшее время преодолеть факторы, сдерживающие широкое применение мехатронных систем в медицинской практике.

## **5 Компьютерная графика**

Широкое использование информационных технологий позволяет создавать виртуальные персонажи - объекты внешне напоминающие живые организмы, имитирующие исполнение некоторой функциональной деятельности, например, исследователя. Сохраняя облик человека такие персонажи активно поддерживают реальную деятельность человека. Конструирование роботов в виртуальной среде требует знания анатомии, биологии, биомеханики и биофизики. Наличие адекватного образа помощника создает условия для творческой деятельности человека. Образ помощника создается средствами компьютерной графики.

Термин компьютерная графика относится к любому изображению или набору изображений, полученных с помощью компьютера. Впрочем, данное словосочетание в этой книге будем применять в основном к трехмерным сценам, оставляя за кадром двумерные рисунки, получаемые в таких графических редакторах, как Photoshop или Paint. Большинство программ, предназначенных для производства двумерной графики, создают растровые изображения, то есть итоговый рисунок состоит из маленьких квадратиков, называемых пикселями. Приложения же для производства SD-графики создают векторные изображения, представляющие собой набор математических кривых. Это более мощный и действенный метод. Более подробную информацию о векторных и растровых изображениях вы получите чуть позднее.

Для пользователей, знакомых с такими приложениями, как Adobe Illustrator или Macromedia Flash, не является новостью тот факт, что эти программы также создают векторные изображения. В отличие от них, Maya и другие приложения для работы с SD-графикой умеют вычислять третье измерение, то есть добавлять сцене глубину. Объекты больше не рисуются на плоскости — они распределяются в пространстве. Это крайне усложняет работу художников и в корне отличается от того, с чем приходится сталкиваться при создании двумерных изображений.

### *Векторная графика*

Векторная графика для описания изображения использует линии и кривые, называемые векторами, которые также содержат информацию о цвете и расположении. Например, изображение листа описывается точками, через которые проходят линии, создающие форму контура лист. Цвет листа определяется цветом контура и цветом площади, замкнутой внутри этого контура.

При редактировании векторной графики вы изменяете свойства линий и кривых, описывающих форму. Вы можете перемещать, масштабировать, искривлять и раскрашивать векторную графику, не рискуя потерять при этом качество ее отображения. Векторная графика не зависит от разрешения, — это означает, что она может быть отображена с помощью различных устройств вывода, обладающих различными разрешающими способностями, без риска потери качества.

### *Растровая графика*

Растровая графика использует для описания изображений цветные точки, называемые пикселями, они размещены в ячейках сетки. Например, изображение листа описывается расположением и цветом каждого пикселя, принадлежащего сетке, при этом изображение как мозаика складывается из отдельных точек.

При редактировании растровой графики вы изменяете пиксели, а не линии и кривые. Растровая графика зависит от разрешения, потому что данные, описываемые пикселями, фиксируются в сетке конкретного размера. Редактирование растровой графики может изменять качество ее отображения. В частности, масштабирование растровой графики может приводить к появлению неровностей по краям, так как пиксели в сетке перераспределяются. Отображение растровой графики на устройстве вывода, имеющем более низкое разрешение, чем само изображение, тоже снижает качество отображения.

*Моделирование персонажей*

Истоки создания виртуальных персонажей следует искать в работах мастеров по механике прошлого. Насколько это сложно создать типичный макет куклы в механическом исполнении ясно из рисунка.

**U.S. Patent**

Jan. 5, 1993

Sheet 1 of 3

**5,176,560**

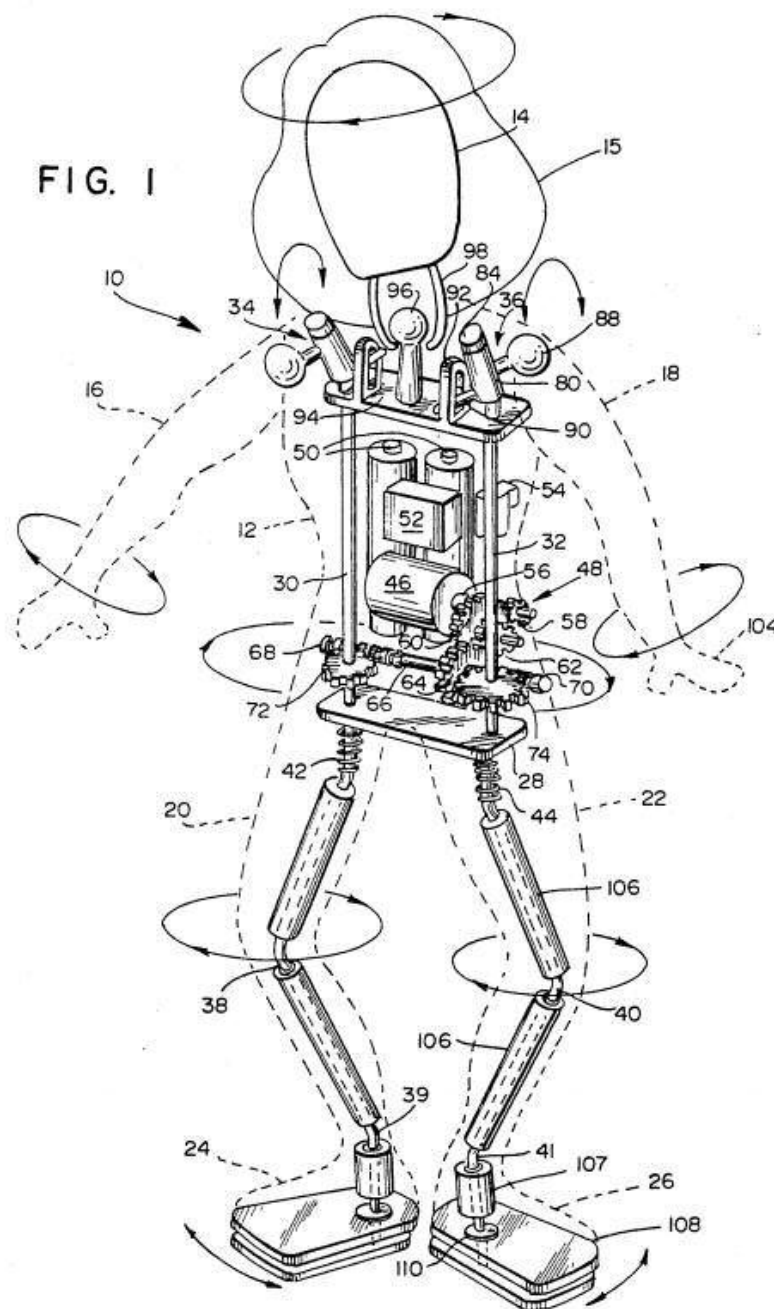


Рисунок 5.1 Механическая модель куклы

*Для детального ознакомления с патентом можно воспользоваться представленными на рисунке данными*

Для создания компьютерного образа этот процесс представляется иначе. Это процесс моделирования с использованием программного продукта. Термин моделирование обычно подразумевает создание одушевленных персонажей, например животных, людей, инопланетян и т. п. В процессе моделирования всегда нужно помнить, что эти объекты впоследствии будут анимированы. Обычно моделирование проводится посредством программ компьютерной графики. Здесь применяются разные технологии. Одни допускают наличие самостоятельно рисованных персонажей, а другие предлагают использовать шаблоны. И те другие имеют известные предпочтения и преимущества.

Большинство персонажей строятся или на основе сшитых друг с другом кусков поверхностей, или же растяжением единого объекта и «выдавливанием» его участков. Так как при анимации модели персонажей тем или иным способом деформируются, необходимо, чтобы они были бесшовными. Другими словами, моделировать персонажей необходимо с учетом процесса их будущей анимации. Детализация персонажа также должна соответствовать его месту в сцене. Часто приходится создавать несколько вариантов одного и того же персонажа для различных сцен анимации.

### Анимации

Создание персонажа начинается с задания цепочки элементов, имитирующих часть скелета человека. Это типичная процедура, составляющая основу многих компьютерных программ. Скелет представляет собой иерархическую цепочку. Создаваемые (цепочки из библиотеки программы) кости сразу связываются друг с другом соотношением «предок — потомок», при этом наверху оказывается корневой сустав (root joint), который становится предком для всех ниже расположенных костей. В качестве примера рассмотрим ногу (рис. 5.1). Корневым является бедренный сустав. Коленный сустав является по отношению к нему потомком, в свою очередь являясь предком расположенного ниже голеностопного сустава. В самом низу иерархической цепочки находятся пять суставов, управляющих сгибанием пальцев ноги.

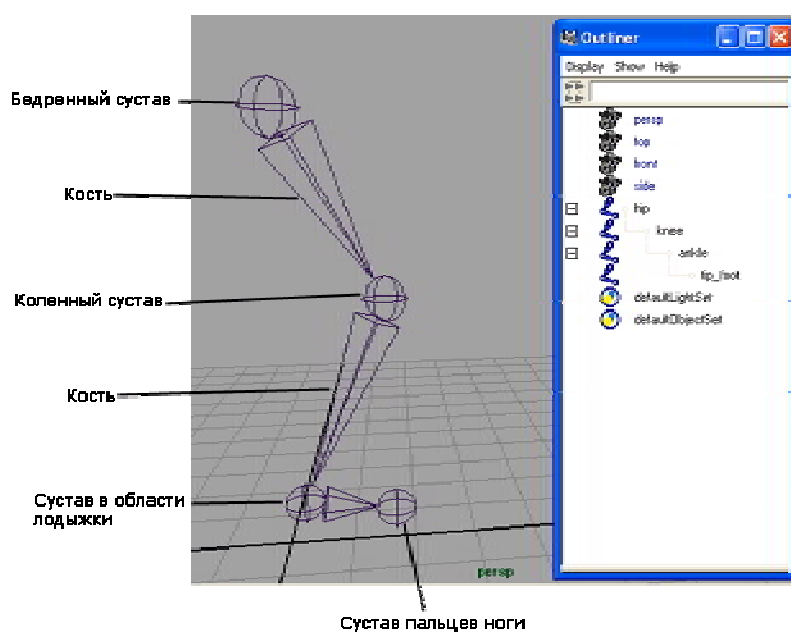


Рис. 5.1. Иерархическая цепочка костей, формирующих ногу

Скелет позволяет немедленно получить пригодную для анимации иерархическую цепочку, которая повторяет форму геометрической оболочки. Соответственно, в процессе соединения скелета с оболочкой деформировать последнюю не требуется. Оболочка становится дочерним объектом по отношению к системе костей, то есть ее преобразования повторяют преобразования элементов скелета. Скелет представляет собой всего лишь набор сгруппированных и корректно размещенных опорных точек, называемых суставами (joints). Именно с их помощью осуществляется перемещение, а в некоторых случаях и деформация геометрической оболочки. Кости (bones) всего лишь задают расстояние между двумя суставами. Кроме того, они делают систему более наглядной.

Для анимации системы костей используются методы прямой и обратной кинематики. В первом случае нужная поза придается поворотом самого старшего в иерархической цепочке сустава. Этот метод применялся при создании покадровой анимации, в которой положение кукол менялось и фиксировалось в каждом кадре. Изменение положения манекена достигалось непосредственным поворотом суставов (рис. 5.2).

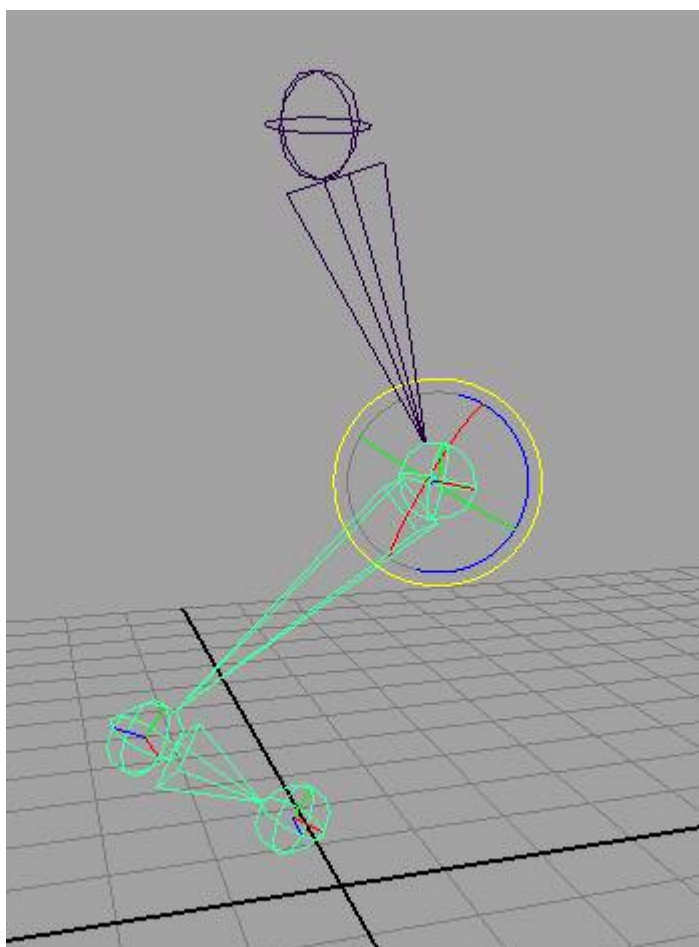


Рис. 5.2. Анимация по методу прямой кинематики

Поворот сустава влияет на положение всех дочерних по отношению к нему членов иерархической цепочки. Поворот бедренного сустава вверх заставит колено и голеностопный сустав совершить такое движение, как будто нога бьет по мячу. Поворот коленного сустава вниз заставит лодыжку повернуться так, как будто человек садится. Такая форма реакции на преобразования свойственна обычной иерархической цепочке. Именно поэтому данный метод называется методом прямой кинематики (forward kinematics).

В методе обратной кинематики (inverse kinematics (ИК)) движением управляет сложная система присоединенных к конечным суставам цепочек ИК-манипуляторов (IK-handles). Основа ИК-системы присоединяется к суставу, который выбран корневым для данного ИК-сегмента. Это может быть произвольный сустав иерархической цепочки.

Кости и суставы в методе обратной кинематики двигаются только под действием ИК-манипуляторов. При этом ИК-решатель определяет, как повернуть суставы цепочки, чтобы они соответствовали изменившемуся положению манипулятора. Поворот суставов, в свою очередь, приводит к изменению положения костей.

Представьте, что кто-то взял кисть вашей руки и перемещает ее. Этот кто-то, держащий вас за руку, является аналогом ИК-манипулятора. Перемещение кисти заставляет остальные кости руки поворачиваться в плечевом и локтевом суставах, а также в области запястья. Анимация начинается с самого младшего члена иерархии (рис. 5.3). Именно поэтому данный метод называется методом обратной кинематики.

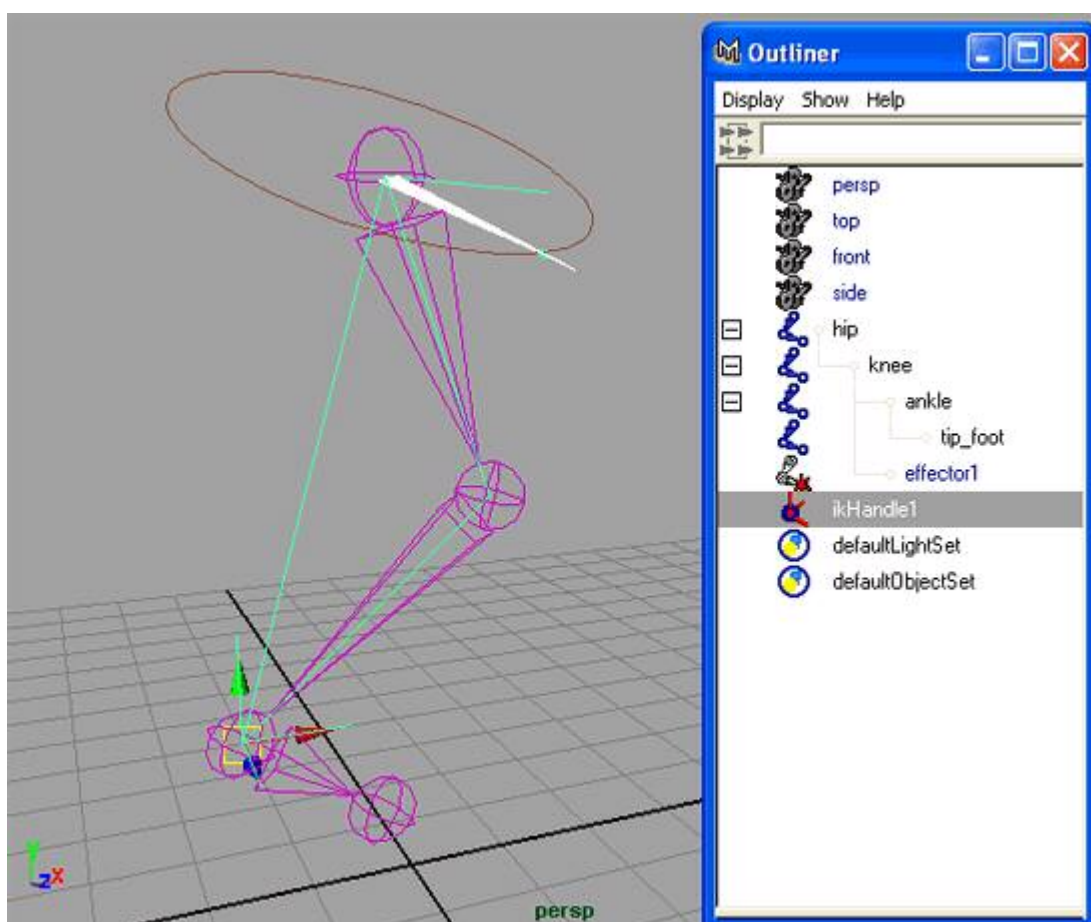


Рис. 5.3. Анимация системы костей по методу обратной кинематики

Другой метод основан на шаблоне. Для начала из библиотеки извлекается шаблон - стандартный набор. В графическом виде это представлено в виде нескольких линий, несколько напоминающих скелет тела человека. Дальнейшая работа с эталонным набором происходит на основе подготовленного образа - рисованной самостоятельно картинке человека. Это может быть портрет, реальное фото, сложный объект погруженный в фон или несколько объектов. Тонкости этого процесса рекомендуется посмотреть в материалах лабораторного практикума.



Анимация реализуется также в технологии морфинга. Морфинг (англ. morphing, трансформация) — технология в компьютерной анимации, визуальный эффект, создающий впечатление плавной трансформации одного объекта в другой. Используется в игровом и телевизионном кино, в телевизионной рекламе. Встречается в трёхмерной и двухмерной (как растровой, так и векторной) графике. Морфинг также часто используется для создания анимации, когда не стоит задача добиться эффекта превращения одного объекта в другой, а требуется лишь выстроить промежуточные состояния между двумя (и более) ключевыми положениями анимируемого объекта.

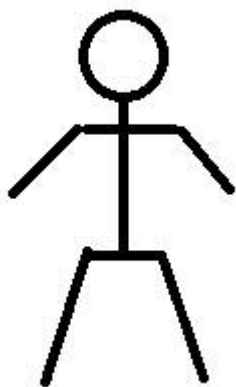


Рисунок 5.4. Эталон - шаблон изготовления анимированной сцены

Морфинг — это видеоэффект, заключающийся в плавном перетекании одного изображения в другое. Иногда морфингом называют эффект наплыва, когда одна сцена затемняется или затуманивается, а вторая в это время проявляется все резче и сменяет первую. Однако лучше разделять эти понятия. В отличие от наплыва, морфинг обеспечивает соответствие характерных (наиболее привлекающих внимание) точек и контуров начального и конечного изображений. Например, преобразование одного лица в другое, при котором задается соответствие положения характерных

точек глаз, носа и т.д.

Существует целый ряд программ для морфинга на ПК, позволяющих быстро создать интересные эффекты. За несколько минут можно сделать видеоролик, превращающий ребенка в пожилого человека, одно животное в другое, изменить марку автомобиля и т.д. Морфинг-роликом можно украсить скринсейверы, web-страницы, рекламные и музыкальные клипы, видеофильмы, образовательные ролики, презентации, поздравительные открытки

## Основы анимации

Термин - анимировать дословно обозначает «давать жизнь»; анимирование – передвижение чего-нибудь (или впечатление от того, что что-либо двигается), что не может двигаться само по себе. Первые попытки запечатлеть движение в рисунках относят к палеолитическим пещерным рисункам, где животных изображали с множеством ног, перекрывающих друг друга (рисунок 5.5.).



Рис 5.5 Изображение динамичного объекта

Первые упоминания о таких устройствах относят ко второму веку нашей эры – в Китае изобрели зоетроп (около 180 г. н.э., изобретатель – Дин Хуань). Современный вариант зоетропа изображен на рисунке 5.6. В 18 веке были изобретены и стали первыми популярными устройствами для проигрывания анимации фенакистоскоп, праксиноскоп и кинеограф

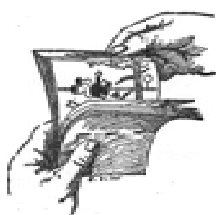


Рисунок 5.6 Колода карт с рисунками

Фенакистоскоп использует набор вращающихся щелей, чтобы показать наблюдателю последовательность изображений посредством помещения двух дисков, вращающихся вместе, на одну ось; на одном диске имеются щели, на другом –

изображения. Наблюдатель смотрит вдоль оси вращения, так что щели проходят перед его глазами, и может видеть последовательность изображений с другого диска. Праксиноскоп использует набор вращающихся зеркал внутри большого цилиндра с изображениями, смотрящими в сторону зеркал. Расположены зеркала таким образом, что показывают изображения наблюдателю.

Бурное развитие анимации началось в начале 20 века. Сразу несколько человек примерно в одно время и независимо друг от друга начали работу над созданием анимационных фильмов. Джордж Мелис случайно изобрел технику съемки, называемую «остановка-движение». Суть этой техники заключалась в следующем: Мелис снимал кадр, затем менял что-то в снимаемой сцене, затем снимал следующий кадр и так далее. После чего, быстро сменяя эти кадры, добивался анимационного эффекта. Американец Стюарт Блэктон анимировал дым в сцене в 1900 году. Винсер Мак Кей, вероятно, создал первый анимационный мультфильм в 1906 году. Уолт Дисней был первым, кто использовал звук в анимации. Дисней также был одним из пионеров в использовании цвета в анимации. Одним из наиболее существенных нововведений студии Диснея было изобретение многоплоскостной камеры, позволявшей получать эффекты параллакса, вытянутых форм фигур, глубины и нечеткости. Его студией создано множество анимаций, персонажи которых известны по сей день (Микки Маус, Плуто, Гуффи и т.д.). Коммерческий успех первых аниматоров широкого показа создал почву для появления новых анимационных студий. К 1930 году уже функционировало множество таких студий, среди которых – функционирующие по сей день Universal Pictures, Paramount, Warner Brothers и другие.

Очень важным направлением в компьютерной анимации является создание искусственного человека, неотличимого от настоящего. Это направление рассматривает возможность создания виртуального персонажа - робота, стремящегося находиться в постоянном диалоговом контакте с человеком.

Методы компьютерной анимации разделяют на методы, основанные на процедурной анимации, и методы, основанные на использовании ключевых кадров [20].

#### Процедурная анимация

В этом виде анимации движение алгоритмически описывается списком преобразований (переносов, поворотов и т.д.). Каждое преобразование определяется параметрами (такими как угол поворота). Эти параметры могут изменяться в процессе анимации согласно законам биофизики.

#### *Анимация, основанная на использовании ключевых кадров*

Задание анимации объектов во многих ранних компьютерных анимационных системах было основано на задании значений переменных, связанных с этими объектами, на некоторых кадрах (называемых ключевыми), и автоматизированном расчете значений этих переменных в остальных кадрах. Вышеупомянутые переменные могут отражать в себе координаты положения или углы ориентации объекта, степень прозрачности грани объекта и т.д. Эти переменные в литературе часто называют сочлененными переменными (articulation variables – avars).

#### *Интерполяция*

В кадрах, которые не являются ключевыми, значения интересующих параметров получают, интерполируя значения в ключевых кадрах. При этом, основываясь на особенностях конкретной решаемой задачи, рассматривают следующие моменты:

- Выбирают между интерполяцией и аппроксимацией. Если задано множество точек, описывающих кривую, важно вначале определить, представляют ли заданные в ключевых кадрах значения точки, через которые кривая должна пройти, или они используются для управления формой кривой и не являются точными значениями. В первом случае часто используют сплайны Эрмита и сплайны Кэтмула-Рома. Во втором – кривые Безье и Б-сплайны.
- Сложность. Напрямую зависит от выбранного интерполирующего уравнения – чем оно проще, тем быстрее вычислить значение интерполирующей функции, заданной этим уравнением.
- Непрерывность. Выбор интерполирующего или уравнения в зависимости от необходимой гладкости кривой.

- Глобальное или локальное управление. Определение метода интерполирования в зависимости от нужд пользователя при редактировании значений кривой в ключевых кадрах – необходимо ли, чтобы при изменении значения в какой-либо ключевом кадре менялась вся кривая, либо только ее ограниченная область.

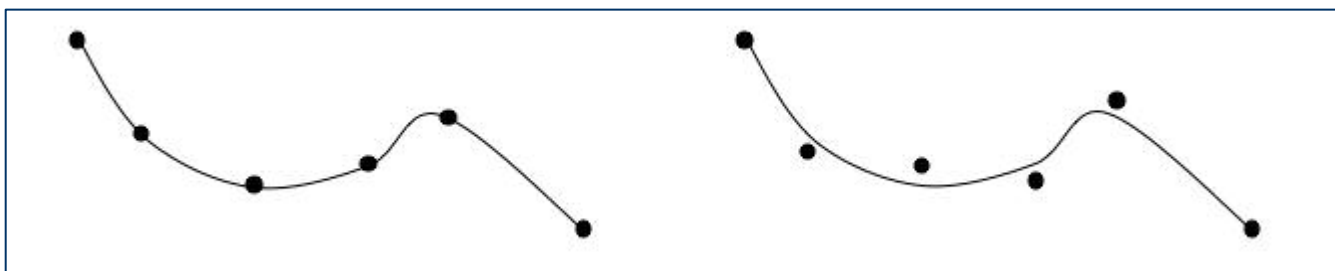


Рисунок 5.7 – интерполяция (слева) и аппроксимация (справа)

### Управление скоростью

Построение кривой, связанной со значениями параметром в ключевых кадрах, является только первым шагом в анимации. Скорость, с которой происходит движение вдоль кривой, зачастую должна быть под контролем аниматора. Прежде всего, он должен иметь возможность двигаться вдоль кривой значений параметров с постоянным шагом, после чего он может легко ускорить или замедлить движение. Для движения с постоянным шагом требуется установить связь между расстоянием вдоль кривой и значением параметра. Эту связь называют параметризацией длины дуги пространственной кривой. Для ее определения используют методы численного интегрирования.

После параметризации пространственной кривой становится возможным управлять скоростью, с которой происходит движение по кривой. Движение по кривой с постоянной длиной дуги приводит к движению с постоянной скоростью. Возможности ускорения/замедления могут быть получены при помощи функций управления скоростью, которые сопоставляют равноотстоящим значениям параметра (т.е. времени) такие длины дуг, что получается желаемое движение по кривой. Наиболее распространенным примером такого управления скоростью является движение с плавным входом/плавным выходом. При таком способе управления скоростью происходит плавное движение при ускорении объекта из состояния с нулевой скоростью до некоторой, плавное достижение максимальной скорости и плавное торможение. Для этого функцию скорости часто выбирают синусоидой.

### Движение вдоль кривой.

Различные сложности могут возникнуть при движении (изменении интересующего параметра) по выбранной кривой с определенной скоростью. Если, к примеру, этим параметром является положение трехмерного объекта, а параметрической кривой – траектория его движения, то необходимо принять во внимание также и ориентацию объекта. Если объект или камера движется вдоль кривой, то их ориентацию можно сделать непосредственно зависимой от кривой. Для этого используют рамку Френе. Рамку Френе определяют как движущуюся правостороннюю координатную систему, задаваемую тремя нормализованными векторами  $T$ ,  $N$ ,  $B$ , где  $T$  – вектор, обладающий направлением касательной к кривой,  $B$  ортогонален к  $T$  и имеет направление второй производной кривой,  $N$  является векторным произведением  $T$  и  $B$ .

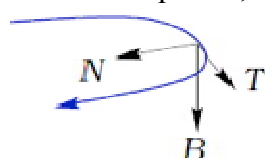


Рисунок 5.8 – рамка Френе

При движении камеры по кривой для определения ее ориентации обычно опираются на задание точки, в которую камера смотрит (центр интереса камеры).

Если один объект движется по поверхности другого объекта, то ориентацию первого можно рассчитывать исходя из нормали к поверхности второго в точке, где находится первый объект.

### *Преобразование кривой в кривую*

Параметрами, заданными в ключевых кадрах, также могут быть кривые. К примеру, в одном ключевом кадре задана окружность, в следующем – граница квадрата. Задача состоит в определении промежуточных кадров (т.е. в определении кривых, составляющих анимацию перехода от окружности к квадрату). В общем случае решение задачи зависит напрямую от способа задания кривых. В простом случае, если известно поточечное соответствие между кривыми в ключевых кадрах, то решение данной задачи сводится к интерполяции между соответствующими точками кривых во времени.



Рисунок 5.9 – преобразование окружности в границу квадрата

В другом случае, если кривые заданы коэффициентами параметрических функций, то промежуточные кривые получают посредством интерполяции параметров этих функций.

### *Интерполяция между трехмерными объектами*

Общего решения пока не существует. Однако для частных случаев есть решения. Методы этих решений делят на две категории:

- основанные на работе с поверхностями (surface based). Используют граничное представление объектов и изменяют один из них или оба, чтобы их реберно-вершинные топологии совпадали. После этого вершины объектов интерполируют между собой. Имеются ограничения на типы объектов, с которыми они могут работать, особенно на объекты со сквозными дырками через них.
- основанные на работе с объемами (volume based). Рассматривают объемы, заключенные внутри объектов, и приводят один объем к другому. Эти методы имеют преимущество в том, что они менее чувствительны к различным топологиям объектов. Вычислительно более затратные, чем методы, основанные на работе с поверхностями.

### *Деформация 2D и 3D объектов*

Объекты с одинаковой структурой ребер могут быть интерполированы между ключевыми кадрами по вершинам этих ребер для плавного перехода от одной формы объекта к другой.

Стоит сказать несколько слов о возможностях и методах, которые предоставляют средства анимации для деформации двумерных и трехмерных объектов, чтобы задавать их в ключевых кадрах.

Искажение объекта. Аниматор может двигать за какие-то вершины на объекте, при этом изменяются либо только смежные с этой вершиной точки, либо более широкая область.

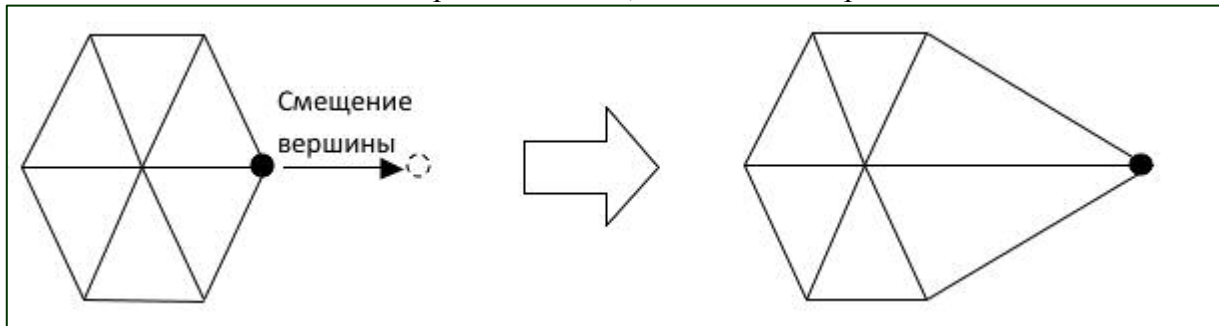
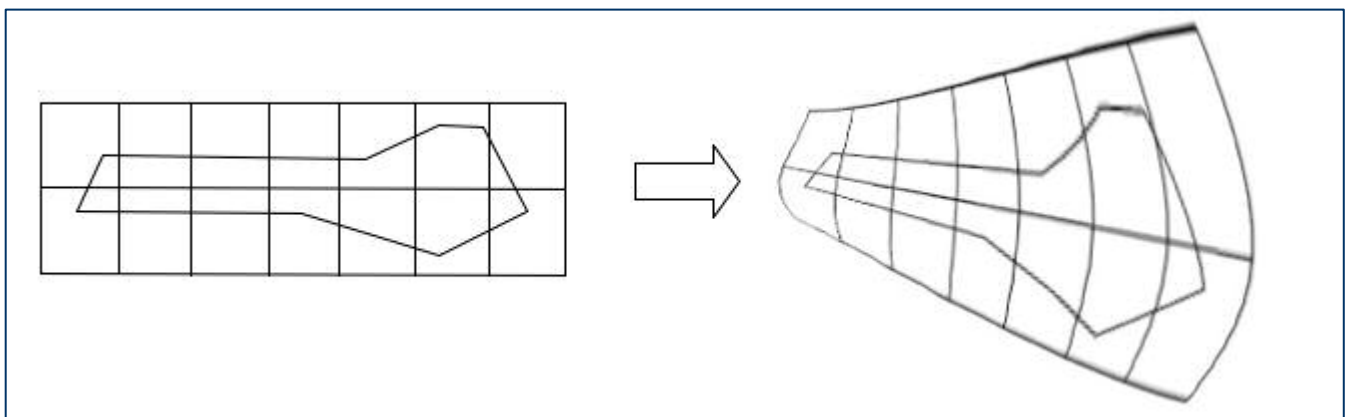


Рисунок 5.10 – преобразование окружности в границу квадрата

Деформация координатной сетки. Метод приписывается Сэдербергу [6]. Выбирается локальная система координат, связанная с объектом. Эта локальная координатная система каким-либо образом искажается пользователем, и локальные координаты вершин отображаются в гло-



бальной системе координат.

Рисунок 5.11 – деформация координатной сетки

#### *Методы, связанные со структурными моделями объекта*

Часто более важной задачей для аниматора является создать общее качество движения, нежели точно управлять положением и ориентацией каждого объекта в каждом кадре. Это имеет место в случае физического моделирования; при работе с большим количеством объектов; при анимировании объектов, движение которых ограничено тем или иным образом; при работе с фоновыми объектами, точное движение которых не является важным для анимации. В таких случаях выявляют структуру работы анимируемого объекта, и на ее основе строят структурную модель. Разделяют кинематические и динамические структурные модели. Кинематическое управление относится к движению объектов без рассмотрения сил, вовлеченных в получение движения. Динамическое управление связано с вычислением сил, используемых для получения движения.

#### *Кинематические модели*

Одним из простых примеров является модель, описывающая положение и ориентацию камеры. В анимации часто необходимо задавать параметры камеры таким образом, чтобы захватить разговор, отследить действие и т.д. При использовании высокоуровневых алгоритмов для управления движением объектов аниматор может быть не в состоянии предвидеть точное положение объектов в сцене во время анимационной последовательности. Вследствие этого аниматор не может точно знать, как расположить и ориентировать камеру так, чтобы захватить важное действие.

В подобных случаях стандартным решением является расположение камеры и/или центра ее взгляда относительно положений одного или нескольких объектов в анимации. К примеру, центр ее взгляда может быть всегда направлен в центр масс объектов, составляющих анимацию, а положение быть таким, чтобы захватывать все объекты анимации.

Анимация объектов, состоящих из нескольких соединенных жестких частей, описывается обычно с помощью иерархических кинематических моделей. Соединения различают по количеству степеней свободы (от одной до трех). Строится древовидная модель объекта, состоящая из вершин и дуг, отвечающих соединениям и жестким частям объекта соответственно. Дерево строят таким образом, что изменение соединения, соответствующего какой-либо вершине дерева, влечет за собой изменение частей объекта и соединений между ними, соответствующих поддереву измененной вершины.

Если необходимо промоделировать изменение одного из соединений, применяют преобразование к соответствующему поддереву, последовательно обходя его вершины «в глубину» (этот процесс называют прямой кинематикой)

Бывают и обратные задачи, когда задано начальное и конечное положение одной из дуг, входящих в лист структурного дерева, и необходимо вычислить углы в соединениях, необходимые для данной конфигурации. Например, структурная модель – каркас человеческого скелета; дуга, входящая в лист – кисть руки; начальное положение – кисть находится выше уровня головы; конечное положение – кисть находится ниже уровня головы; необходимо определить, каким образом нужно развернуть плечевой и локтевой сустав, чтобы из начального положения перейти в конечное положение. Такие задачи как могут не иметь решений вовсе, так и иметь одно или несколько решений. Процесс их решения называют обратной кинематикой. Для достаточно простых соединений углы можно определить аналитически. Для более сложных механизмов, которых большинство, применяют итеративные численные методы.

### *Динамические модели*

Кинематические модели часто не годятся для передачи реалистичного движения объектов, так как не имеют в своей основе физических законов. Динамические модели, напротив, ставят в основу реалистичную передачу реакции твердых тел на воздействие физических сил, таких как сила тяжести, вязкость, трение, силы, возникающие при столкновениях. Силы могут возникать из-за положения объектов относительно друг друга (например, силы тяжести, трения, при столкновении), или абсолютного положения объектов в задаваемых пользователем условиях (например, пользователь указал, что на объект воздействует такая-то сила извне). При воздействии на объекты силы порождают линейные и угловые ускорения, зависящие от массы объекта (линейное) и от распределения массы внутри объекта (угловое).

Эти ускорения изменяют скорости объектов (линейные и угловые). Скорости изменяют положения и ориентации объектов. Новые положения и ориентации объектов приводят к новым силам, и процесс повторяется до следующего шага по времени. На основе этого алгоритма работает большинство имитаторов воздействия физических сил на объекты.

Важной задачей, связанной с динамическими моделями, является определение наступления столкновения тел и их реакции на это столкновение. Проверка на столкновение может происходить в конкретный момент времени либо на протяжении конечного интервала времени. Эти вычисления могут быть достаточно сложными при работе со сложной геометрией. Реакцию на столкновение моделируют, основываясь на физических законах столкновения твердых тел. Есть два подхода к моделированию реакции на столкновение. Первый заключается в продолжении движения проникающего объекта в другой настолько это получится, при этом накладывая в мо-



мент проникновения соответствующие силы, возникающие при столкновении, на элементы столкновения (штрафной метод). Зачастую, при использовании такого метода проникновение может быть замечено визуально. Второй подход заключается в отходе к предыдущему моменту времени перед столкновением и прираще соответствующих сил столкновения в тот момент.

#### *Моделирование природных явлений*

Среди объектов, наиболее сложных для моделирования и анимации на компьютере есть такие, которые не определяются устойчивыми статическими структурами с простой топологией.

#### *Моделирование газообразных явлений*

Существует три подхода к моделированию газа: метод, использующий решетки, метод частиц и комбинированный метод.

В методе, использующем решетки, пространство разбивают на отдельные ячейки, и рассчитывается перемещение газа внутри и из каждой ячейки (перемещение плотностей).

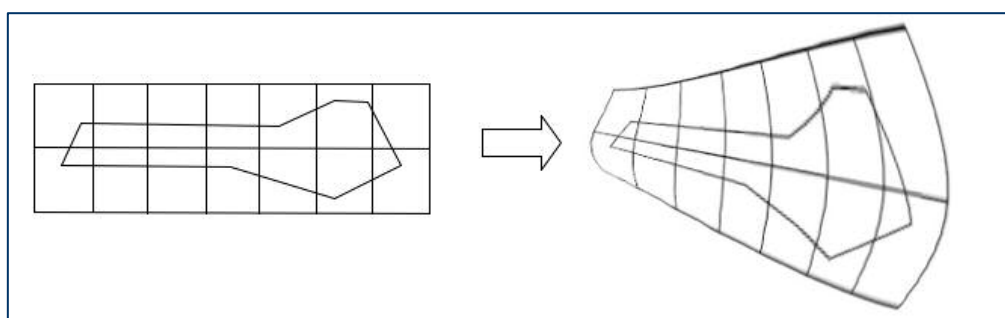


Рисунок 5.12 – схематичное распределение плотностей и скоростей газа в ячейках решетки.

*Чем сильнее сила штриховки, тем плотнее газ в данной ячейке решетки.*

*Чем длиннее стрелка, тем больше скорость газа в данной ячейке решетки*

Плотность газа в каждой ячейке используется для определения видимости и освещенности газа в процессе расчета изображения. Поток в ячейку рассчитывается перераспределением плотностей из соседних ячеек. Внешние силы (ветер, препятствия) используются для перерасчета ускорений частиц внутри ячейки. Основной недостаток – статическая решетка, которая не позволяет при больших ячейках передавать изменения плотности газа в небольших участках, а при малых ячейках вычислительно сложно рассчитывать все изменения плотностей. Для устранения этого недостатка применяют динамическое разбиение пространства (которое, правда, увеличивает сложность алгоритма). Визуализация газа основана на проектировании плотностей газа в ячейках сетки на плоскость изображения.

В методе частиц отслеживается перемещение в пространстве частиц или шариков газа. Недостаток – нужно очень много мелких частиц для моделирования плотного газа. Преимущество – к частицам применимы физические законы для твердых тел, поэтому легко описать их движение. Визуализируются все частицы отдельно.

Комбинированный метод совмещает вышеупомянутые методы решеток и частиц. В таких методах отслеживается перемещение частиц в пространственной сетке. На основе количества частиц в ячейке делается вывод о ее плотности, и визуализация аналогично визуализации в методе, использующем решетки. Физически более точные методы основываются на уравнениях Навье-Стокса.

Огонь является особенно сложным и вычислительно емким для моделирования процессом. Существует несколько подходов к моделированию огня.

Один из них – использование систем частиц. Частицы взрывообразно, в различных случайных направлениях выпускают из «очага» пламени.

Другой подход – использование двумерных анимированных текстурных карт, ориентированных к наблюдателю и изменяющихся во времени. Были попытки и физически корректного моделирования огня.

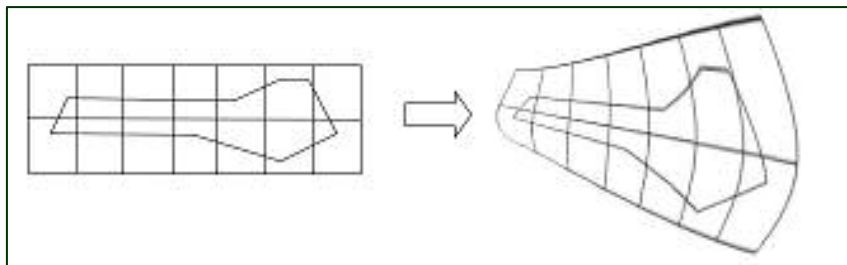


Рисунок 5.13 – схематичное представление системы частиц с различными направлениями и скоростями, соответствующими длинам стрелок

### Моделирование воды

Воду моделируют в зависимости от применения по-разному. Можно моделировать воду как неподвижную, выглядящую твердой поверхностью, к которой рябь добавляется с помощью возмущения нормалей к поверхности, как при отображении шероховатости поверхности. Такого способа обычно достаточно для моделирования спокойных озер и луж со стоячей водой. Для возмущения нормали используется одна или более синусоидальных функций, чтобы изменить направление вектора нормали к поверхности. Примером такой функции является следующая:

$$h(s, t) = A \cdot \cos\left(\left(\frac{s}{L} + \frac{t}{T}\right) \cdot 2 \cdot \pi\right)$$

где  $h$  – высота волны,  $s$  – расстояние от источника возмущения волны,  $L$  – длина волны,  $t$  – время,  $T$  – период волны (время, необходимое волне, чтобы пройти через заданную точку),  $A$  – амплитуда волны. По высоте волны в конкретной точке и высотам в окружающих точках рассчитывают нормаль в этой точке. Можно использовать сетку для моделирования поверхности воды, и привязать высоты точек этой сетки к уравнению, записанному выше.

Для моделирования более реалистичных волн используют более сложные модели, учитывающие больше физических эффектов. При моделировании океанских волн, например, вводят зависимость высоты волны от глубины воды в данной точке; волновую функцию представляют как сумму волн различной формы с различными амплитудами. Брызги и пена, образующиеся при разрушении волн и на волнах, сталкивающихся с препятствиями, можно имитировать с использованием вероятностной управляемой системы частиц.

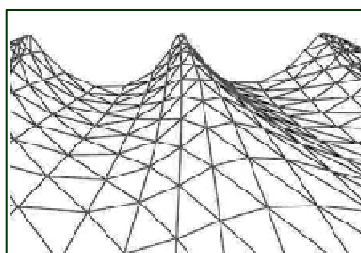


Рисунок 5.14 – Модель высот океанских волн



В большом количестве ситуаций необходимо еще моделировать перемещение воды из одного положения в другое (при моделировании океанских волн этого обычно не требуется). Например, необходимо промоделировать сбегаящий поток воды с возвышенности. Для моделирования течения используют упрощенные уравнения Навье-Стокса.

### Моделирование растений

Растения обладают ветвистой рекурсивной структурой с неограниченной сложностью. Топология растений описывается ветвистой рекурсивной структурой. Существует несколько методов моделирования изменения структуры растения по мере роста – это использование систем частиц, фракталов и L-систем. L-системы представляют собой систему правил вывода, к примеру  $\{S \rightarrow AB, A \rightarrow Y, B \rightarrow Z\}$   $\{S \rightarrow AB, A \rightarrow Y, B \rightarrow Z\}$ . Правило вывода применяется к строке, если его левая часть содержится в этой строке. Символы системы интерпретируют в терминах структурных элементов растения, а применение правила интерпретируется как изменение структуры (рост). Для введения недетерминированности роста вводят так называемые вероятностные L-системы: правил вывода для одной и той же левой части может быть несколько, и выбор между ними осуществляется на основе распределения вероятности. Например, для системы правил  $\{S \rightarrow AS, S \rightarrow BS\}$   $\{S \rightarrow AS, S \rightarrow BS\}$ , где A означает порождение ветви растения в левую сторону, B – в правую, и, к примеру, можно задать равные вероятности на первое и второе правило.

Помимо структурной составляющей по мере роста учитывают удлинение соответствующих элементов растения. Это обычно делается путем внесения параметров в модель, отвечающую за рост структуры растения. В случае L-системы имеем параметрические L-системы.

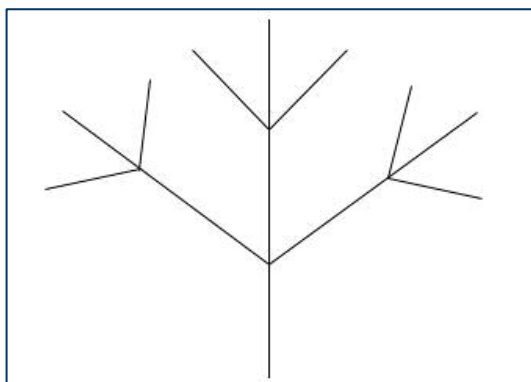


Рисунок 5.15 – схематичная модель дерева, построенная

Кроме того, уделяют внимание и взаимодействию растущего растения с окружающим его пространством. Различные физические препятствия (как части самого растения, так и другие объекты пространства), различные глобальные факторы, такие как гравитация, ветер, количество света могут влиять на рост растения. Учет данных влияний опять таки приходится на добавление параметров к модели, отвечающей за рост структуры растения.

### Анимация модели человека

Моделирование и анимация человека – очень сложная задача по нескольким причинам. Люди в вопросах анимации людей являются первыми критиками - человек легко различит кажущиеся ненастоящими движения анимированной модели. Помимо этого, форма человеческого тела очень сложна (содержит более двухсот костей и более шестисот мускулов). Кроме того, части тела могут деформироваться, а это еще более усложняет задачу анимации. К тому же человекоподобное движение вычислительно плохо описывается.

### Руки

Задача анимации моделей человеческих рук является одной из самых распространенных в области анимации человеческой модели. Базовая модель человеческой руки может быть представлена манипулятором с семью степенями свободы (рисунок 7). Поза руки – набор из семи углов в соединениях, по одному на каждую степень свободы. Базовая модель должна учитывать и ограничения на соединения в человеческой руке. Например, локтевой сустав может сгибаться приблизительно до 20 градусов и разгибаться приблизительно до 160 градусов.



Рисунок 5.16 – базовая модель руки человека

Некоторые движения руки можно успешно моделировать вышеописанной прямой кинематикой. Обратная кинематика позволяет решать задачи, связанные с поиском поворотов руки для достижения необходимого положения и ориентации кисти. Однако в связи с ограничениями на повороты решения, полученные применением обратной кинематики, могут выглядеть неестественно. Анатомическая основа получения человекоподобных положений тела отсутствует.

### Ноги

Другой задачей, относящейся к анимации модели человека, является моделирование ходьбы или бега. Строят структурную модель ног человека, сохраняющую основную информацию о суставах, участвующих в движении, и описывают цикл движения (ходьбы или бега) в терминах структурных элементов модели ног. После этого прямой кинематикой описывают различные походки, согласно указанному циклу и структурной модели ног. Иногда, как отмечают Жирар и Масижевски, для создания физически более правильного движения для отображения описанных действий и ограничений можно использовать динамическое моделирование (моделирование, основанное на законах физики). Они отмечают, что динамику можно применять в разумных пределах, пока она будет помогать аниматору, а не окажется препятствием, с которым аниматору придется бороться. Существует несколько способов упрощения. Один из них – некоторые динамические свойства игнорируются, например, воздействие машущей ноги на равновесие. Другой – относительно небольшие изменения игнорируются, и сила считается постоянной на некотором временном интервале. Третий – сложная структура, вроде ноги с семью степенями свободы, заменяется упрощенной структурой, например, ноги с одной степенью свободы.

### Лицо

Реалистичная анимация лица – одна из самых трудных задач компьютерной анимации. Лицо является сложной изменяющейся формой, у которой имеются четко выделяемые связанные части. Хорошая модель лица должна быть способна обеспечить геометрическое представление конкретного человека (эту способность называют статичностью). Если требуется создать анимацию мультипликационного типа, то для анимации лица зачастую хватает простой геометрической формы (например, сферы), на которую накладывают анимированные текстуры. Для более реалистичной анимации лица используются сложные геометрические модели, которые намного более приближены к геометрическим свойствам человеческих лиц.

Модель можно рассматривать с точки зрения ее статических или динамических свойств. Статические свойства связаны с геометрией лица в неподвижной форме, динамические – с деформацией геометрии модели лица при выполнении анимации.

Для представления геометрии используют три основных метода:

- *Полигональные модели.* Плюсы данных моделей в том, что их легко создавать и деформировать, но гладкость поверхности напрямую зависит от сложности полигональной модели. Используются наиболее часто ввиду их простоты.
- *Сплайновые модели.* Обычно используют кривые Безье или В-сплайны. Достигается визуально приемлемая гладкость модели, однако очень сложно сохранять низкую сложность данных при моделировании маленьких элементов и заостренных локальных черт лица.
- *Поверхности подразбиения.* Используют полигональную управляющую сетку, которая уточняется, в пределе стремясь к описываемой поверхности. Преимущество использования данного метода в том, что есть возможность создания локальных усложнений модели без глобального усложнения. Однако интерполяция заданного набора данных поверхностями подразбиения является сложной задачей, поэтому этот метод практически неприменим для моделирования конкретного лица.

Создание моделей лица ведется либо вручную в специальных средах по трехмерному редактированию геометрии (либо с нуля, либо, что делается чаще, изменением стандартных моделей), либо используются методы построения трехмерных моделей лица по фотографиям. Наиболее часто в основе анимации лица лежит использование параметризованной модели лица. Параметры его модели разделяются на конформационные (служат отличительными признаками данных головы и лица) и выразительные (связаны с анимацией лица). В модели Парке 22 конформационных параметра, предполагается, что лицо симметрично. Имеются следующие выразительные параметры:

- Пять параметров управляют формой лба, скул, щек, подбородка и шеи.
- Тринадцать параметров описывают размеры и расстояния между элементами лица (размеры головы; расстояние от подбородка до рта; расстояние от подбородка до глаза; расстояние от глаза до лба; размеры глаза; ширина челюсти, щек, переносы и ноздрей).

Пять параметров описывают смещение элементов лица (подбородка, кончика носа, бровей).

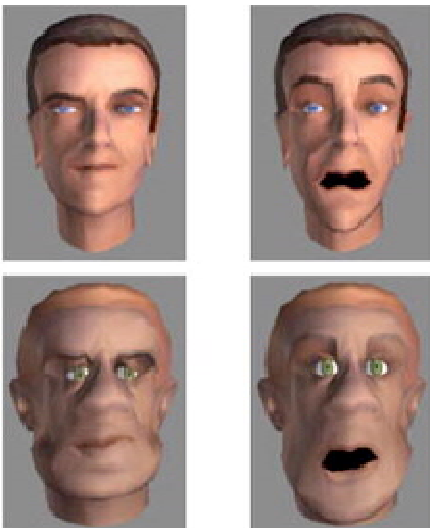


Рисунок 5.17 – изменение параметров лицевой модели для достижения нужного выражения лица

Простейшим подходом к анимации лица является определение ключевых положений лица. Для получения анимации выбирается два ключевых положения (заданные параметрами), после чего между ними происходит интерполяция. Обобщением этого подхода является использование взвешенной суммы двух или более ключевых положений – так добиваются получения положений лица, отличающихся от ключевых.

Психологи Экман и Фризен провели исследование, в результате которого выявили 46 базовых движений лица, из которых могут быть получены все выражения лица. Проблемы применения данной работы в практической компьютерной анимации в том,

что все выражения лица могут быть получены только из нейтрального.

Существуют также модели анимации лица, основанные на мускулах. Они более сложны, нежели параметрические модели. Различают модели, в которых мышцы моделируются на поверхности кожи и модели, в которых мышцы присоединяются к структурному слою, расположенному под кожей. Первый способ проще тем, что для системы моделирования необходимо наличие толь-

ко поверхностной модели лица. Второй – анатомически корректен и поэтому потенциально представляет более точные результаты, однако требует более сложной структуры модели.

### Захват движения

Захват движения (motion capture) включает обнаружение, оцифровку и запись движения объекта. Объект захвата движения обычно оборудуется какой-либо измерительной аппаратурой так, чтобы положение ключевых точек на нем было легко обнаружить и зафиксировать в любой момент времени. После этого в эти положения можно поместить трехмерную компьютерную модель и анимировать ее так, что она будет повторять движения рассчитанных положений.

Существует два основных подхода к измерению:

- Электромагнитные датчики. Датчики размещают на суставах, и они передают информацию о своем положении и ориентации на центральный процессор для записи их перемещений. Для передачи данных на ЦП датчики используют проводную или беспроводную передачу. Преимущество – положение и ориентацию каждого датчика в трехмерном пространстве можно записывать и показывать в реальном времени. Недостатки – размеры и точность магнитного поля.
- Оптические метки. Носителям этих меток необходимо носить на себе только отражающие метки. Этот метод не представляет информации в реальном времени. Движения носителя записывают на видео, после чего видео обрабатывают на предмет нахождения данных меток и определения их положений в пространстве. Для качественного определения положения меток требуется вести запись с нескольких калиброванных камер, при этом на теле носителя должно быть большое количество меток (больше, чем при использовании электромагнитных датчиков).

Метод захвата движения применяется для анимирования виртуальных моделей людей (или пришельцев, как в фильме Аватар) в современной киноиндустрии.

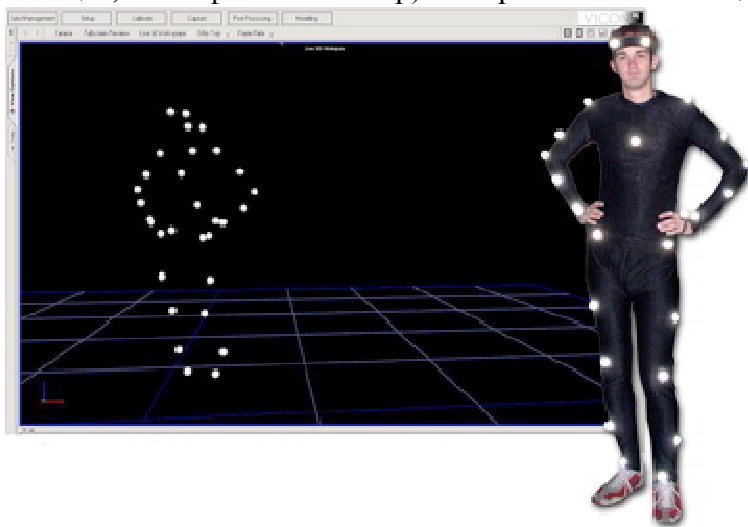


Рисунок 5.18 Пример технологии захвата движения

### Заключение

Компьютерная анимация начинала с простых методов, пришедших из традиционной анимации, и основывалась в основном на интерполяции между ключевыми кадрами. Затем появились кинематические и динамические модели для структурных представлений объектов. Со временем методы компьютерной анимации все больше ориентируются на более точное соблюдение законов биофизики и динамические модели.

### **Литература**

1. Пэрент Р. Компьютерная анимация / Пер. с англ. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2004. 560 с.
2. Синявский В. История развития анимации. Обзор основных методов компьютерной анимации.. Компьютерная графика и мультимедиа. Выпуск №9(1)/2011.  
<http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue19/animhist>