



# ВВЕДЕНИЕ В МЕХАТРОНИКУ



Министерство образования и науки Украины

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

# **ВВЕДЕНИЕ В МЕХАТРОНИКУ**

*Учебное пособие*

Харьков 2014

УДК 621.865.8  
ББК 34.816  
М 54

*Утверждено редакционно-издательским советом университета,  
протокол №2 от 12.12.2013 г.*

Рецензенты: **Димитров Л.**, к-т техн. наук, декан Машиностроительного факультета  
Софийского технического университета  
**Верезуб Н.В.**, д-р техн. наук, проф.  
НТУ «Харьковский политехнический институт».

Коллектив авторов: А.И. Грабченко, В.Б. Клепиков, В.Л. Доброскок, Г.К. Крыжный,  
Н.В. Анищенко, Ю.Н. Кутовой, Д.А. Пшеничников, Я.Н. Гаращенко

М 54      **Введение в мехатронику:** уч. пособие / А.И. Грабченко, В.Б. Клепиков, В.Л. Доброскок и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.

ISBN 978-966-303-527-7

Учебное пособие подготовлено в соответствии с учебным планом магистерского курса «Основы мехатроники» по специальности «Технология машиностроения» в НТУ «Харьковский политехнический институт». В учебном пособии представлены основные научные подходы, терминология принятая в мехатронике, структура и виды мехатронных систем, методы их построения и управления. Пособие предназначено для магистрантов и аспирантов технических вузов.

Навчальний посібник підготовлено відповідно за навчальним планом магістерського курсу «Основи мехатроніки» за фахом «Технологія машинобудування» в НТУ «Харківський політехнічний інститут». У навчальному посібнику представлено основні наукові підходи, термінологію з мехатроніки, структуру і види мехатронних систем, методи їх побудови та управління. Посібник призначено для магістрантів і аспірантів технічних вузів.

This textbook has been prepared in accordance with the curriculum of the master course «Fundamentals of mechatronics» on the specialty «Mechanical engineering» in NTU «Kharkiv Polytechnic Institute». Basic scientific approaches and terminology, which are established in mechatronics, the structure and types of mechatronic systems, methods of their construction and control are presented in this textbook. The textbook is intended for students and graduate students of technological universities.

УДК 621.865.8  
ББК 34.816

ISBN 978-966-303-527-7

© НТУ «ХПИ», 2014.  
© Коллектив авторов, 2014.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее учебное пособие – результат участия кафедр «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф. Семко и «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» в европейском проекте TEMPUS «Двойной магистерский диплом по автоматизации / мехатронике стран ЕС – стран партнеров».

В проекте участвовали ВУЗы Болгарии, России, Украины, Франции и Чехии. Его цель – совершенствование подготовки магистров по специальности «Мехатроника» с защитой двух дипломов в стране обучения и одной из зарубежных стран ЕС. В выполнении проекта участвовали разнопрофильные кафедры, в частности, выпускающие магистров в области автоматики, компьютерных технологий, автоматизированных электромеханических систем, технологии машиностроения.

Такая многопрофильность небезосновательна, поскольку мехатронные системы интегрируют механические, электромеханические, электронные и компьютерные компоненты в единую систему автоматического управления.

Создание таких систем требует знаний в области механики, электротехники, электрических машин, преобразовательной и электронной техники, компьютеров и микропроцессоров, программирования, теории систем автоматического управления, конструирования.

Между тем, учебные планы и программы вышеуказанных кафедр существенно отличаются и не учитывают в должной мере многообразие задач, связанных с мехатронными системами.

Кроме того, мехатроника в своем развитии прошла значительный путь, сформировав как наука, свои понятия, терминологию и методы.

Мехатронные устройства нашли широкое применение в различных областях деятельности человека в виде роботов, манипуляторов, мехатронных транспортных средств и устройств автоматизации технологических процессов, и их роль будет возрастать.

Студенту, окончившему бакалавратуру по одному из ранее указанных направлений и выбравшему продолжение обучения в



магистратуре по специальности «Мехатроника», предстоит выполнить магистерскую работу, связанную с решением отдельных задач создания и исследования мехатронной системы. При этом характер задач может определяться профилем кафедры и направлением подготовки в бакалавратуре: конструированием, схемотехникой, программированием, анализом и синтезом мехатронной системы как системы автоматического управления и др. Однако решение данной задачи должно выполняться с четким представлением о сущности всей мехатронной системы.

В связи с этим нам представилось целесообразным написать данное учебное пособие как «Введение в мехатронику», которое должно облегчить дальнейшую работу со специальной литературой при выполнении магистерской работы.

Это особенно целесообразно для украинских университетов, поскольку в перечне специальностей Вузов Украины специальность «Мехатроника» отсутствует. Ряд кафедр решением Совета Вуза ввели обучение в магистратуре по мехатронике в виде специализации. Открытие на данных кафедрах специализации «Мехатроника» для подготовки магистров достаточно хорошо согласуется с учебными планами и программами бакалаврата по направлению «Электромеханика». При этом магистратура должна предусматривать расширение и углубление знаний по программированию, конструированию, датчикам информации, диагностике с учетом специфики мехатронных систем.

Содержание пособия позволяет уяснить принятые в мехатронике терминологию, понятия и определения, дает представление о структуре и видах мехатронных систем, методах построения мехатронных модулей и их компонентах, о датчиках координат движения и технологических параметров. В пособии описаны методы управления мехатронными модулями и системами, в том числе интеллектуальные, функционирующие по аналогии с мозгом человека.

Работа по написанию учебного пособия распределилась между авторами следующим образом: введение, гл. 1 и разд. 7.4 – Клепиков В.Б., гл. 2 – Доброскок В.Л., гл. 4 и разд. 5.1-5.4 – Гаращенко Я.Н., гл. 3 – Крыжный Г.К., разд. 5.5, 5.6 и гл. 6 – Кутовой Ю.Н., разд. 5.7, 5.8.3, 7.1-7.3 – Анищенко Н.В., разд. 5.8.1, 5.8.2 и 5.9 – Пшеничников Д.А., под общей редакцией А.И. Грабченко.

# **Глава 1 | ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОНИКИ. МЕХАТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Термин «мехатроника» появился в 1969 г. в Японии, где активно проводилась разработка прецизионных электроприводов для станков с программным управлением и обрабатывающих центров. Автор термина, Тецуро Мориа (Tetsuro Moria) – старший инженер компании «YASKAWA ELECTRIC». Этот термин был им введен для обозначения осуществлявших приведение в движение рабочих органов машин и агрегатов, электромеханических устройств с электродвигателями, управляемыми электронными полупроводниковыми преобразователями и представлял комбинацию слов «механика» и «электроника».

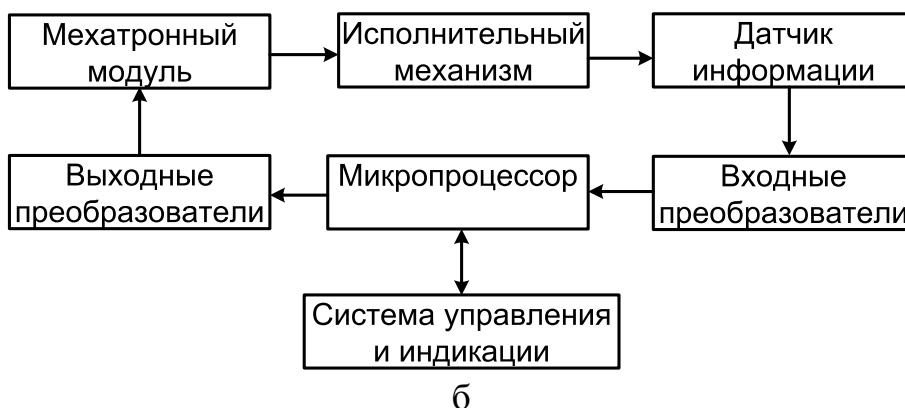
В СССР, Германии и в некоторых других странах устройства преобразования электрической энергии в механическую для приведения в движение рабочих органов (исполнительных механизмов), начиная с 30-х годов прошлого столетия получили название «электрический привод». Этот термин в Японии и США не был распространен, что обусловило введение для характеристики данного класса устройств нового определения. Первоначально термин «мехатроника» был зарегистрирован как торговый знак. Технические успехи Японии в области электроники, станкостроения и создании роботов обусловили достаточно широкое распространение этого термина, в том числе в США, и компания впоследствии отказалась от использования его как товарного знака. Из иностранных источников термин «мехатроника» пришел и утвердился в европейских странах и СССР.

С методической точки зрения целесообразно уяснить сходство и отличия системы электропривода в традиционном понимании и мехатронной системы. С этой целью рассмотрим функциональные схемы электропривода и мехатронной системы (рис. 1.1).

Уясним общие признаки и различие системы электропривода в традиционном понимании и мехатронной системы, исходя из их функциональных схем.

На рис. 1.1а представлена схема электропривода, который по определению является электромеханической системой, предназначенной для преобразования электрической энергии в механическую и

6



Электрический привод состоит из следующих элементов:

- *электродвигательного устройства* (ЭДУ), предназначенного для преобразования электрической энергии в механическую. Роль ЭДУ обычно выполняют различного вида электродвигатели;
- *силового преобразовательного устройства* (СПУ), предназначенного для преобразования параметров электрической энергии: напряжения, тока, частоты, источника электрической энергии (ИЭЭ) к значениям, необходимым для питания ЭДУ. В современных электроприводах СПУ выполняют на базе полупроводниковых приборов – тиристорах и транзисторах различных типов;
- *передаточного механизма* (ПМ), осуществляющего преобразование параметров механической энергии ЭДУ к заданному виду (вращательное, поступательное) и требуемым значениям (крутящего

момента, силы, частоты вращения, скорости), необходимым для функционирования рабочего органа (исполнительного механизма) машины или агрегата;

– *датчиков параметров (координат) Д1-Д3*, характеризующих текущее состояние ЭП, информация о которых используется для формирования обратных связей, необходимых для управления движением в соответствии с технологическими и техническими требованиями. Координатами являются токи и напряжения СПУ и ЭДУ, движущие и упругие моменты, скорость, угловое и линейное перемещения и др.;

– *управляющего устройства (УУ)*, которое на основании задающего сигнала  $U_z$  и сигналов от датчиков обратных связей вырабатывает необходимый сигнал управления, подаваемый на силовое преобразовательное устройство. Управляющие устройства в своем развитии прошли путь от релейных, ламповых, транзисторных схем усиления и логики, регуляторов на операционных усилителях до современных компьютерных устройств – микропроцессоров. Сигнал задания поступает от оператора, программного блока либо от компьютеризированной системы более высокого уровня иерархии, контролирующего ход технологического процесса в целом.

В ГОСТах СССР электропривод определялся как «устройство». Рабочий орган (исполнительный механизм) и источник электрической энергии в его состав не включались.

Однако создание электропривода, исследование динамических и установившихся режимов, синтез системы ЭП, обеспечивающей требуемые показатели регулирования, невозможен без знания статических и динамических характеристик нагрузки. При питании от источника электрической энергии ограниченной мощности следует учитывать и его параметры. Поэтому на практике система ЭП рассматривалась как единая электромеханическая система, включающая в свой состав вышеуказанные компоненты. Это нашло отражение в более поздних определениях ЭП как **электромеханической системы**.

Рассмотрим функциональную схему мехатронной системы, представленной на рис. 1.1, б. В данной схеме:

– *микропроцессор* выполняет роль управляющего устройства, формируя на выходе в цифровой форме сигнал управления, исходя из поступающих к нему сигнала задания от «системы управления и

индикации» и сигналов от датчиков информации через входные преобразователи;

- *датчики информации* фиксируют текущие значения координат движения исполнительного механизма в виде электрических сигналов;

- *входные преобразователи* преобразуют значения электрических сигналов к виду, воспринимаемому микропроцессором, т. е. к цифровой форме;

- *выходные преобразователи* преобразуют цифровое значение выходного сигнала микропроцессора в электрический сигнал управления мехатронным модулем;

- *мехатронный модуль* обеспечивает преобразование электрической энергии источника питания в механическую с значениями крутящего момента и скорости, необходимыми для работы исполнительного механизма;

В данной схеме отсутствует источник электрической энергии, что может быть объяснимо для автономных роботов, если полагать, что он входит в состав мехатронного модуля. Однако для мехатронных систем промышленных роботов и станков с ЧПУ роль источника выполняет электрическая сеть, т. е. предполагается, что, как и в электроприводе он не входит в состав мехатронной системы.

Укажем на общие признаки и отличия рассматриваемых систем электропривода и мехатронной системы.

Главным **общим признаком** обеих систем является то, что они являются электромеханическими системами и их задачей является преобразование электрической энергии в механическую и управление движением рабочего органа (исполнительного механизма) в соответствии с требованиями технологического процесса. Это значит, что и **мехатронные системы, и электропривод относятся к одному классу – электромеханическим системам.**

Рассмотренная на рис. 1, б мехатронная система может быть подсистемой более **сложной мехатронной системы**, включающей в себя несколько мехатронных модулей, что в теории электропривода соответствует **многодвигательному взаимосвязанному электроприводу.**

Перечислим отличия, вытекающие из сопоставления обеих функциональных схем.

В мехатронной системе роль управляющего устройства выполняет микропроцессор, а в электроприводе это могут быть и иные, в том числе аналоговые устройства.

В функциональной схеме мехатронной системы отсутствуют блоки СПУ – силового электронного устройства, питающего электродвигатель, ЭДУ – электродвигательного устройства, ПМ – передаточного механизма. Это возможно лишь в том случае, если выполняющие их функции блоки сосредоточены в мехатронном модуле. Это обстоятельство ограничивает предел мощности мехатронных систем, т. к. создание мехатронных модулей мощностью в сотни и тысячи кВт весьма затруднительно. Таким образом, системы электропривода, выпускаемые в диапазоне мощности от долей Ватт до десятков тысяч кВт являются более широким классом электромеханических систем (ЭМС), к которым следует отнести и мехатронные системы (МС), которые, однако, в силу своих особенностей, достоинств и сфер применения следует рассматривать как специальный класс ЭМС. Следовательно, системы электропривода и мехатроники относятся к одному классу управляемых электромеханических систем.

Исторически, вышеуказанные свойства МС были обусловлены тем, что в период, начиная с 60-х годов XX века, шло быстрое развитие средств электроники, полупроводниковых преобразовательных устройств, компьютерной техники, программирования и интеллектуальных методов управления. Это, в свою очередь, обеспечило условия создания автоматических систем управления с широкими функциональными возможностями. При этом в полупроводниковой технике происходило увеличение преобразуемой одним элементом электрической мощности, улучшались динамические характеристики полупроводниковых приборов: быстродействие, управляемость. В компьютерной технике возможности управления необычайно расширило появление микропроцессорных устройств, сокращение их веса и габаритов при одновременном повышении быстродействия и объемов памяти.

Развитие программного обеспечения и совершенствование компьютерной техники позволило реализовать интеллектуальные методы управления: нечеткая логика, нейронные сети, а также генетические алгоритмы.

Развитие техники создало предпосылки для объединения (интеграции) вышеуказанных устройств (полностью или частично) в едином конструктивном исполнении мехатронного модуля. Такое

исполнение обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционной раздельной компоновкой электрических приводов: уменьшаются габариты, вес, протяженность электрических и механических связей, исключаются промежуточные интерфейсы, сокращаются производственные площади, повышается надежность работы. Важным достоинством в ряде случаев является также повышение жесткости упругих кинетических звеньев вследствие сокращения их длины, что, в свою очередь, способствует снижению динамических нагрузок и повышению точности отработки координат движения.

Вышеуказанное дает основание говорить о **синергетическом эффекте** интегрального исполнения устройства, при котором положительный эффект умножается по сравнению с раздельным исполнением тех же компонентов.

Наиболее ярко синергетический эффект проявился при создании определенных видов машин и механизмов, определивших направления широкого использования мехатронных систем:

- роботы и робототехнические комплексы;
- технологические машины-гексаподы;
- транспортные мехатронные системы.

Далее в пособии (гл. 3) более подробно будут описаны мехатронные системы различных видов. Отметим лишь, что в процессе их развития они нашли широкое применение во многих отраслях промышленности: машиностроительной, электротехнической, горнодобывающей, текстильной, строительстве, и др., а также здравоохранении.

Наиболее ярким примером мехатронных устройств являются роботы и манипуляторы, нашедшие благодаря гибкости и приспособляемости к технологическим процессам, широкое применение в сварочном, лакокрасочном производстве, в выполнении сборочных операций, пайке электронных плат, выборке и комплектации изделий, прокладке труб, укладке текстиля, лазерной, ножевой и водной порезке материала, шлифовании, складировании, исследовании морского дна, космических исследованиях и др.

В настоящее время активные широкомасштабные работы по их разработке и производству осуществляются в основном в трех странах, на которые приходится 77% всего мирового выпуска (Япония – 38%, США – 26%, Германия – 10%).



## **Вопросы для самопроверки**



1. Какие функциональные блоки входят в мехатронную систему и каково их назначение?
2. Каковы общие признаки и в чем различие системы электропривода и мехатронной системы?
3. В чем проявляется синергетический эффект мехатронного модуля?
4. В каких областях наиболее широко используются мехатронные системы?

## **Список литературы к разделу 1**



1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: – Энергоатомиздат, 2011. – 697 с.
2. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: учеб. пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 80 с.
3. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод. – К.: Либідь, 2005. – 678 с.
4. Giurgiutiu V., Lyshevski S.E. Micromechatronics: Modeling, Analysis and Design with MATLAB, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003 (first edition) and 2008 (second edition). – Pp. 920.
5. Záda V. Robotika: matematické aspekty analýzy a řízení. Liberec, 2012. – 210 с.

### ***2.1 Определения и терминология мехатроники***

Современный термин «Мехатроника», согласно японским источникам, был введен фирмой Yaskawa Electric в 1969 году. Это название получено комбинацией терминов «МЕХАника» и «ЭлекТРОНИКА». Такое объединение в едином словосочетании означает интеграцию знаний в соответствующих областях науки и техники, которая позволила создать условия для появления техники новых поколений и производства новейших видов оборудования.

Аналогичным образом шло развитие электромеханики как науки, использующей достижения электротехники и механики при создании приводных исполнительных систем широкого назначения. Интеграция электромеханики и микроэлектроники привела к появлению комплектных интегрированных мехатронных модулей движения рабочих органов и узлов машин, а также создаваемого на их основе оборудования. Именно в этом направлении наиболее активно развивалась мехатроника в СССР.

К началу 80-х годов термин «Мехатроника» в мировой технической литературе используется применительно к области проектирования машин с компьютерным управлением движением. И соответственно интегрируя достижения в области электромеханики, электроники и систем компьютерного управления движениями машин и пространственных механизмов.

До настоящего времени «Мехатроника» находится в стадии становления, и ее определение и базовая терминология еще полностью не сформированы. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть известные определения, выражающие суть предмета мехатроники.

В известных определениях подчеркивается триединая сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Видимо поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга (рис. 2.1).

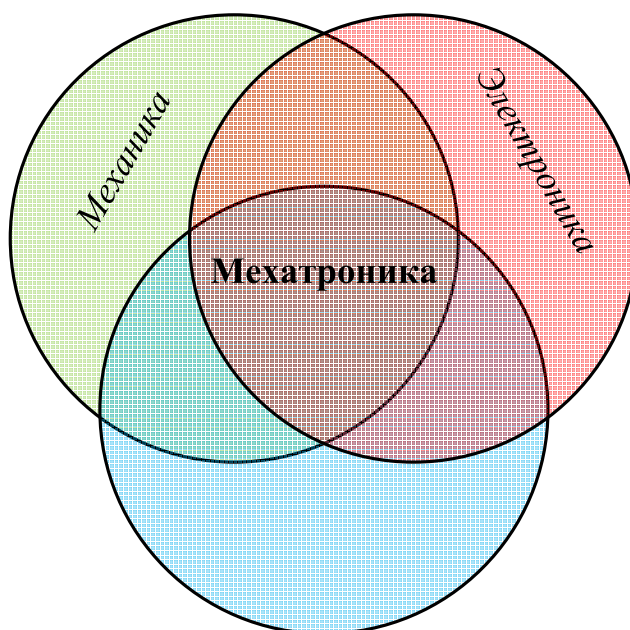


Рис. 2.1. Определение термина «Мехатронная система»

Таким образом, системная интеграция трех указанных видов элементов является необходимым условием построения мехатронной системы.

Терминологии мехатроники в Украине на данный момент не существует. В Российской федерации есть определение, сформулированное в образовательном стандарте направления обучения «Мехатроника и робототехника»:

*Мехатроника – область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.*

Oxford Illustrated Encyclopedia предлагает следующее определение:

*Мехатроника – японский термин для описания технологий, возникших на стыке электротехники, машиностроения и программного обеспечения. Включает проектирование, производство и изучает функционирование машин с «разумным» поведением, т.е. действующих по заданной программе.*

В википедии предлагается следующее определение термина:

*Мехатроника или инжиниринг мехатронных изделий – комбинация машиностроения, электроники, вычислительной техники и ав-*

*томатического управления, проектирования систем, с целью проектирования и производства конкурентоспособной продукции. Мехатроника – мультидисциплинарное техническое системное проектирование, которое исключает разделение разработки по каждой из дисциплин.*

Современные тенденции развития промышленности обуславливают следующую трактовку:

*Мехатроника – область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов. С другой стороны, мехатроника – область техники, обеспечивающая полный жизненный цикл мехатронного объекта.*

*Мехатронный объект синтезируется на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными состояниями (в т.ч. движениями).*

Поскольку базовая терминология мехатроники на данный момент не сформирована, то в ряде работ решается задача систематизации и уточнения основных понятий по примеру построения научно обоснованной терминологии, например, в области теории управления. И эта задача актуальна, так как отсутствие единой, упорядоченной терминологии приводит к тому, что один термин может иметь несколько значений (многозначность), или для одного понятия применяется несколько терминов (синонимия).

На данный момент предлагается иерархия терминов мехатроники. В этой иерархии, термин «мехатронный объект» – это обобщающее понятие, которое включает в себя мехатронные систему, агрегат, модуль или узел.

К первому уровню относят мехатронный узел или мехатронный модуль. Мехатронный модуль – унифицированный мехатронный объект, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате. Примерами мехатронных модулей служат части станков – шпиндельная бабка, поворотный стол. В качестве модулей могут выступать

двигатели, редукторы и т.п. Более сложные модули (автономные приводы) – мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель, мотор-барабан и поворотный стол. Узел принципиально отличается от модуля тем, что он не унифицирован.

Второй уровень – агрегат (машина), включающий в себя несколько модулей, предназначенных для реализации заданных движений в условиях взаимодействия с внешней средой. Примеры агрегатов – промышленные роботы, станки с ЧПУ и т.д.

Третий уровень – мехатронная система, состоящая из нескольких агрегатов или агрегата и ряда отдельных модулей, т.е. из объектов одинаковых или разных низших уровней. Система – совокупность компонентов, каким-либо образом связанных между собой: подчиненных определенному отношению, зависимости или закономерности; действующих как одно целое. Она полностью отвечает этому определению как совокупность механических, электронных и управляющих компонентов, образующих синергетическое единство, действующее как одно целое.

Примеры мехатронных систем – гибкие производственные системы или современные автомобили.

Термин «устройство» применяется как общее название для узла (модуля), агрегата (машины). Термин «прибор» относится к измерительным и регулирующим устройствам, предназначенным для получения и преобразования информации.

В дальнейшем к высшему уровню мехатронного объекта возможно будет причислить комплекс, объединяющий несколько систем, либо систему и другие мехатронные объекты различных низших уровней. Определение комплекса в фундаментальном словаре механики машин отсутствует, а в энциклопедическом словаре дается как совокупность предметов, составляющих одно целое. Считается, что в перспективе мехатронные машины и системы будут объединяться в комплексы на основе единых интеграционных платформ (этот термин четко не определен).

Термин «машина» был выведен из иерархии, поскольку в фундаментальном словаре механики машин он отождествлен с агрегатом, а в некоторых работах Артоболевского И.И. машина с приводом называется агрегатом. Соответственно термин «машина» можно оставить как синоним термина «агрегат».

Мехатронные технологии – информационные технологии управления движением, т.е. реализация с помощью информационных технологий сложных законов исполнительных движений, которые по тем или иным причинам не могли быть реализованы с использованием традиционных технологий ранее. Например, интеллектуализация металлорежущих станков и достижения в области динамики резания позволяют с помощью данных технологий управлять различными видами колебаний, динамической характеристикой технологической системы, корректировать возникающие недостатки этой системы и т.д.

Важным является определение признаков мехатронности. Мехатронными объектами являются большинство современных электро-механических систем с управлением. Очень многие электронные объекты фактически являются мехатронными.

К объектам разной степени мехатронности или уровней интеграции можно отнести станки с ЧПУ, промышленные и специальные роботы, многие образцы авиакосмической, военной техники и автомобилестроения.

Мехатронными являются офисная техника (факсы, копиры), средства вычислительной техники (плоттеры, принтеры, дисководы), видеотехника (видеомагнитофоны), бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и др. машины-автоматы), нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски), тренажеры для подготовки пилотов и операторов, шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления).

Мехатронность объектов – динамическое явление, формируемое в процессе их эволюционного развития и совершенствования. Отсюда и различная степень интеграции компонентов и уровня их интеллектуализации.

К полностью мехатронным относят объекты, в которых реализована максимально возможная степень интеграции в сочетании с наивысшим уровнем интеллектуализации.

В настоящее время большей частью применяют мехатронизированные объекты, чем в значительной мере и определяется настоящий период развития мехатроники.

## 2.2 Структура и принципы построения мехатронных систем

Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования (concurrent engineering methods). При традиционном проектировании машин с компьютерным управлением последовательно проводится разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы, а затем выбор интерфейсных блоков.

Парадигма параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех компонент системы.

На рис. 2.2 представлена обобщенная структура машин с компьютерным управлением (автоматических роботов), используемых в машиностроении. Данная схема позволяет показать принципы построения мехатронных систем.

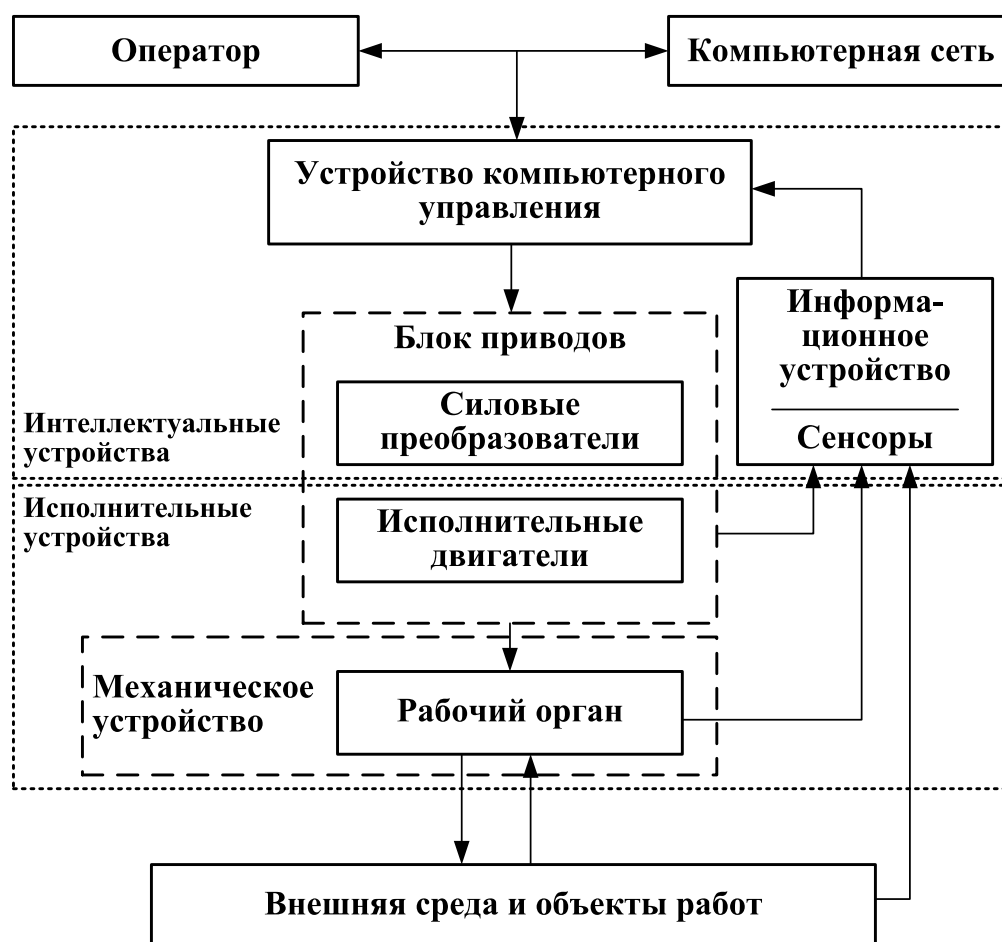


Рис. 2.2. Обобщенная схема машины с компьютерным управлением движением



Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.

При выполнении мехатронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для операций механообработки, контактные силы и моменты сил при сборке, сила реакции струи жидкости при операции гидравлической резки.

Внешние среды делят на два основных класса: детерминированные и недетерминированные. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой точностью для проектирования мехатронных систем. Некоторые среды являются недетерминированными по своей природе (например, экстремальные среды: подводные, подземные и т.п.). Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. Например, для определения сил резания при механообработке проводятся экспериментальные исследования на специальных установках, параметры вибрационных воздействий измеряют на вибростендах с последующим формированием математических и/или компьютерных моделей возмущающих воздействий.

Однако для проведения таких исследований, как правило, требуются слишком сложные и дорогостоящие аппаратура и измерительные технологии. Так для предварительной оценки силовых воздействий на рабочий орган на операции роботизированного удаления облоя с отливок необходимо контролировать их форму и размеры. В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного управления, которые позволяют автоматически корректировать закон движения рабочих органов мехатронных систем непосредственно в ходе выполнения операции.

В состав традиционной машины входят следующие основные компоненты: механическое устройство (конечное звено – 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 мехатронной системы.

Таким образом, наличие трех обязательных частей – механической (электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком мехатронных систем.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в 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. В состав этого устройства обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;
- организация управления функциональными движениями мехатронной системы, которая предполагает координацию управления механическим движением мехатронной системы и сопутствующими внешними процессами.
- взаимодействие с оператором через интерфейс в режимах автономного программирования (off-line) и непосредственно в процессе движения мехатронной системы (on-line).
- организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня управления, в

целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Характерно, что электрическая энергия (реже гидравлическая или пневматическая) используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма.

Особенность мехатронного подхода к проектированию заключается в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы. Соответственно на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как минимум один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, будет выполнять заданное функциональное движение с допустимой погрешностью. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули обязательно сопровождается разработкой интегрированного программного обеспечения.

Программные средства обеспечивают непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени.

Применение мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением определяет их основные преимущества по сравнению с традиционными средствами автоматизации:

- относительно низкую стоимость благодаря высокой степени интеграции, унификации и стандартизации элементов и интерфейсов;
- высокую точность сложных движений вследствие применения методов интеллектуального управления;
- высокую надежность, долговечность и помехозащищенность;
- конструктивную компактность модулей (вплоть до миниатюризации в микромашинах);
- улучшенные массогабаритные и динамические характеристики машин вследствие упрощения кинематических цепей;
- возможность комплексирования функциональных модулей в сложные системы и комплексы под конкретные задачи заказчика.

## **Вопросы для самопроверки**



1. Дайте определение термина «мехатроника».
2. Что такое мехатронный объект?
3. Каким мехатронным уровням может соответствовать технический объект? Приведите примеры.
4. Что такое «устройство»?
5. Мехатронность технических объектов, что это такое?
5. Какие основные принципы положены в основу построения мехатронных систем?
6. Какие устройства могут являться составной частью машин с компьютерным управлением движением?
7. Какие функции выполняет устройство компьютерного управления в мехатронной системе или модуле?
8. Объясните суть мехатронного подхода к проектированию.
9. Какие основные преимущества мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением по сравнению с традиционными средствами автоматизации?

## **Список литературы к разделу 2**



1. Артоболевский И.И. Теория механизмов. – М.: Наука, 1963. – 776 с.
2. Аршанский М.М. Мехатронные технологии обработки металлов резанием // Мехатроника. – М., 2000. – №1. – С. 39–41.
3. Аршанский М.М., Мехатроника: основы глоссария / М.М. Аршанский, Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – М., 2001. – № 4. – С. 47–48.
4. Егоров О.Д. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: учебное пособие / О.Д. Егоров, Ю.В. Полураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
5. Зариктуев В.Ц. К проблеме создания мехатронных станочных систем (информационный аспект) / В.Ц. Зариктуев // Мехатроника. – М., 2000. – № 4. – С. 23–27.

6. Коськин Ю.П. Проблемы и перспективы современного развития электромеханотроники / Ю.П. Коськин, В.В. Путов // Мехатроника. – М., 2000. – №5. – С. 5–9.
7. Крайнев А.Ф. Механика машин: Фундаментальный словарь / А.Ф. Крайнев. – М.: Машиностроение, 2000. – 904 с.
8. Оксфордская иллюстрированная энциклопедия в 9-ти т.т. Изобретения и технология. – М.: Изд. Дом «Инфра-М», 2000. – Т.6. – С. 185.
9. Петров С.Ю. Универсальные регистрирующие и показывающие приборы как элемент иерархии мехатронных объектов / С.Ю. Петров, Е.В. Шалобаев // Мехатроника. – М., 2001. – № 5. – С. 29–34.
10. Подураев Ю.В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю.В. Подураев, В.С. Кулешов // Мехатроника. – М., 2000. – №1. – С. 5–10.
11. Советский Энциклопедический Словарь / Под ред. А.М. Прохорова. – М.: Сов. энциклопедия, 1981. – С. 1600.
12. Теория управления: Терминология. – М.: Наука, 1988. – Вып. 107. – 56 с.
13. Шалобаев Е.В. К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов / Е.В. Шалобаев // Датчики и системы. – М., 2001. – №7. – С. 64–67.
14. Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней / Е.В. Шалобаев // Микросистемная техника. – М., 2000. – №4. – С. 5–9.
15. Шалобаев Е.В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники / Е.В. Шалобаев // Современные технологии: сб.науч.ст. – С.Пб: С.Пб ГИТМО (ТУ). – 2001. – С. 46–67.
16. Harashima F. Mechatronics – «What Is It, Why and How?» / F. Harashima, M. Tomizuka, T. Fukuda // IEEE/ASME Transaction on Mechatronics. – Tokio, 1996. – Vol. 1. – 350 p.

Робот (чеш. robot, от robota – подневольный труд или rob – раб) – автоматическое устройство, созданное по принципу живого организма. Действуя по заранее заложенной программе и получая информацию о внешнем мире от датчиков (аналогов органов чувств живых организмов), робот самостоятельно осуществляет производственные и иные операции, обычно выполняемые человеком (либо животными). При этом робот может, как иметь связь с оператором (получать от него команды) так и действовать автономно.

Внешний вид и конструкция современных роботов могут быть весьма разнообразными. В настоящее время в промышленном производстве широко применяются различные роботы, внешний вид которых (по причинам технического и экономического характера) далек от «человеческого».

### ***3.1 Общая классификация роботов***

Роботы классифицируются по различным признакам, в основном по степени участия человека в их управлении и по характеру выполняемых задач.

**1. По степени участия человека в управлении роботом различают два вида:**

- биотехнические;
- автономные (или автоматические).

**Биотехнические роботы.**

Это все дистанционно-управляемые копирующие роботы; экзоскелеты, роботы, управляемые человеком с пульта управления, и полуавтоматические роботы.

Управление биотехническими роботами базируется на таких принципах:

**Копирующие роботы** имеют следующую управляющую структуру:

- задающий орган (обычно манипулятор), идентичный исполнительному (с масштабом по размерам и усилиям);

- средства передачи сигналов прямой и обратной связи;
- средства отображения для оператора среды функционирования робота.

Движение задающего органа, задаваемое оператором, копируется с точностью до масштабного коэффициента исполнительным органом при помощи следящих систем двустороннего действия.

**Экзоскелеты** – это антропоморфные конструкции, которые обычно «одеваются» на руки, ноги или корпус человека и служат для воспроизведения (копирования) его движений с некоторым масштабным коэффициентом по усилиям. Экзоскелеты зачастую имеют несколько десятков степеней свободы. Подобно копирующим роботам управляются с помощью следящих систем двустороннего действия.

**Роботы, управляемые с пульта управления.** На пульте – система клавиш или рукояток и средства отображения информации. Движение роботу задается человеком с пульта управления через систему исполнительных приводов.

В **полуавтоматических роботах** ручное управление сочетается с автоматическим. Используется, когда заранее жестко запрограммировать все нужные операции невозможно, а оснащать робота искусственным интеллектом нецелесообразно или невозможно.

К полуавтоматическим также относятся роботы с супервизорным управлением: когда оператор вмешивается в действия робота путем сообщения ему дополнительной информации (например, с помощью целеуказания, указания требуемой последовательности действий и т. п.).

#### **Автономные роботы.**

Другой важный класс роботов – это роботы с **автономным, или автоматическим, управлением**. Такие роботы после их создания и настройки могут, в принципе, функционировать и без участия человека. Типичный пример – роботы с элементами искусственного интеллекта, андроиды.

**По типу решаемых роботом задач также выделяют два класса роботов:**

- производственные роботы;
- исследовательские роботы.

#### **Производственные роботы.**

Предназначены для выполнения тяжелой, монотонной, вредной и опасной физической работы. Для таких роботов характерно нали-



чие автоматических исполнительных устройств (манипуляторы, имитирующие движения рук человека, самоходные тележки с различными типами шасси и т. п.).

Производственные роботы делятся, в свою очередь на несколько разновидностей:

- промышленные;
- строительные;
- сельскохозяйственные;
- транспортные;
- бытовые;
- боевые.

**Промышленные роботы** предназначены в основном для автоматизации всех видов ручных и транспортных операций в различных отраслях промышленности. Наибольшее применение они нашли в машиностроении и приборостроении, в горнодобывающей, нефтехимической, металлургической и атомной промышленности.

**Строительные роботы** позволяют автоматизировать огромное количество ручных операций как вспомогательных, так и основных, органически присущих строительному делу. Роботизация строительства сегодня весьма актуальна.

**Сельскохозяйственные роботы** предназначены для автоматизации трудоемких и монотонных процессов в сельском хозяйстве. В настоящее время начинается интенсивная разработка таких роботов, знаменующих начало роботизации сельскохозяйственного производства.

**Транспортные роботы** предназначены для автоматизации управления различными транспортными средствами. Это самоходные тележки, шагающие аппараты, автопилоты и авторулевые.

**Бытовые роботы** служат для автоматизации операций, связанных с бытом человека и со сферой его обслуживания. Зачастую здесь требуются более гибкие и универсальные системы, чем обычные автоматы. Эти роботы должны мыть посуду, стирать, натирать полы, готовить пищу и т. п. К бытовым роботам относятся и роботы-игрушки, которые способны имитировать движения (а иногда и некоторые эмоции) живого существа, социальные роботы.

**Боевые (военные) роботы** заменяют человека в боевых ситуациях для сохранения человеческой жизни или для работы в условиях несовместимых с возможностями человека в военных целях. В настоящее время существует несколько видов боевых роботов. Это

беспилотные или с дистанционным управлением авиационные, подводные аппараты и надводные корабли, роботы-минеры, роботы-саперы, роботы-разведчики и роботы-патрульные. Следует особо отметить, что сегодня боевые роботы управляются человеком, однако есть попытки создать и полностью автономного боевого робота, что вызывает многочисленные и жаркие споры.

### **Исследовательские роботы.**

Исследовательские роботы служат для поиска, сбора, переработки и передачи информации об исследуемых объектах. Объектами могут быть космос, поверхности планет, подводное пространство, подземные полости (шахты, пещеры и т. п.), Арктика и Антарктика, пустыни, зараженная местность и другие труднодоступные для человека области.

**Программы-роботы.** Совершенно отдельно стоят программы-роботы, обычно называемые **ботами**. Они предназначены для автоматизации рутинных задач и чаще всего используются в Интернете: поисковые роботы, чат-боты, icq-боты.

## ***3.2 Классификация промышленных роботов***

Промышленные роботы классифицируются по способу управления, по назначению, по степени специализации, по характеру выполняемых операций, по типу привода, по грузоподъемности, по количеству манипуляторов, по быстродействию и точности движений, по числу степеней подвижности, по способу размещения.

### **По способу управления различают:**

- роботы с программным управлением, работающие по заранее заданной жесткой программе (роботы первого поколения);

- роботы с адаптивным управлением, которые имеют средства очувствления и поэтому могут работать в заранее не регламентированных и меняющихся условиях, например, брать произвольно расположенные предметы, обходить препятствия и т. д. (роботы второго поколения);

- роботы с интеллектуальным управлением (с искусственным интеллектом), которые наряду с очувствлением имеют систему обработки внешней информации, обеспечивающую им возможность интеллектуального поведения, подобного поведению человека в аналогичных ситуациях (роботы третьего поколения).

Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть непрерывным (контурным) и дискретным (позиционным). В последнем случае управление движением осуществляют, задавая конечную последовательность точек и последующее перемещение по ним шагами от точки к точке. Простейшим вариантом дискретного управления является цикловое, при котором количество точек позиционирования по каждой степени подвижности минимально и чаще всего ограничено двумя – начальной и конечной координатами.

**По назначению** промышленные роботы могут быть разделены на несколько групп. Различают роботы для автоматизации процессов **машиностроения, горнодобывающей и нефтяной** промышленности (обслуживание бурильных установок, монтажные и ремонтные работы), **металлургии**, в **строительстве** (монтажные, отделочные, транспортные работы), в **легкой, пищевой, рыбной** промышленности. В последние годы роботы были внедрены на **транспорте** (включая создание шагающих транспортных машин), в **сельское хозяйство, здравоохранение** и в **военной** отрасли.

Наибольшее распространение в промышленности промышленные роботы получили прежде всего в машиностроении, где их различают по следующим группам:

- для обслуживания процессов **литейного** производства (литейные);
- для автоматизации **штамповочного** производства (прессовые);
- для обслуживания процессов **механической** обработки;
- для обслуживания процессов **сварочных** роботов (сварочные);
- для обслуживания процессов **сборочного** производства (сборочные).

**По степени специализации** все промышленные роботы вне зависимости от их назначения делятся на три типа: универсальные, специализированные и специальные.

- универсальные (многоцелевые) роботы предназначены для выполнения разных операций и в том числе для работы совместно с разными видами технологического оборудования;

- специализированные (целевые) роботы имеют более узкое назначение и осуществляют одну определенную операцию (например, сварку, окраску, обслуживание оборудования определенного вида);

- специальные роботы выполняют только одну конкретную операцию (например, обслуживают конкретную модель технологического оборудования);

**По характеру выполняемых операций** все промышленные роботы классифицируются на 3 группы:

- производственные (технологические), которые выполняют основные операции технологического производства и непосредственно в нем учувствуют в качестве производящих или обрабатывающих машин (сварочные, сборочные и т.д.);

- подъемно-транспортные (вспомогательные), которые применяются для обслуживания основного технологического оборудования для выполнения вспомогательных операций, а также на транспортно-складских операциях;

- универсальные – выполняют разнородные основные и вспомогательные ТО.

**По типу привода.** Приводы, используемые в роботах, делятся на:

- электрический;
- гидравлический;
- пневматический;
- и пневмо-гидравлический.

Часто их применяют в комбинации, например, в звеньях манипулятора большой грузоподъемности используют гидравлический привод, а в его захватном устройстве – более простой и маломощный пневматический.

**По грузоподъемности** промышленные роботы делятся на:

- сверхлегкие – до 1 кг;
- легкие – до 10 кг;
- средние – до 100 кг;
- тяжелые – до 1000 кг;
- и сверхтяжелые – свыше 1000 кг.

Грузоподъемность робота обуславливается грузоподъемностью его манипуляторов, а при наличии нескольких манипуляторов – грузоподъемностью наиболее мощного из них.

**По количеству манипуляторов** промышленные роботы бывают:

- одноманипуляторные (однорукие);
- двурукие;
- трехрукие;
- четырехрукие.

В большинстве случаев количество манипуляторов у роботов ограничено одним. Обычно манипуляторы многорукого робота выполняют одинаковыми, но существуют конструкции роботов с разными

манипуляторами. Например, промышленные роботы для обслуживания прессов холодной штамповки с двумя разными манипуляторами: один основной – для взятия заготовки и установки ее на пресс и другой упрощенной конструкции – для выполнения более простой операции сталкивания готовой детали в бункер.

**Классификация роботов по быстродействию и точности движений.** Эти параметры взаимосвязаны и характеризуют динамические свойства роботов. В робототехнике они являются главными.

Быстродействие манипулятора определяется скоростью его перемещения по отдельным степеням подвижности. Быстродействие роботов общего применения можно разбить на три следующие группы:

- малое – при линейных скоростях по отдельным степеням подвижности до 0,5 м/с;
- среднее – при линейных скоростях свыше 0,5 до 1 м/с;
- высокое – при линейных скоростях свыше 1 м/с.

Большинство современных роботов имеют среднее быстродействие и только 20 % их общего парка – высокое быстродействие.

Быстродействие современных роботов является пока недостаточным и требуется увеличить его по крайней мере вдвое. Основная трудность здесь связана с известным противоречием между быстродействием и точностью.

Точность манипулятора характеризуется результирующей погрешностью позиционирования (при дискретном движении) или отработки заданной траектории (при непрерывном движении). Чаще всего точность роботов характеризуют абсолютной погрешностью.

Точность роботов общего применения подразделяют на три группы:

- малая – при линейной погрешности от 1 мм и выше;
- средняя – при линейной погрешности от 0,1 до 1 мм;
- высокая – при линейной погрешности менее 0,1 мм.

**По числу степеней подвижности.** Число степеней подвижности – это сумма возможных координатных перемещений объекта манипулирования относительно опорной системы.

**По способу размещения** промышленные роботы бывают стационарные и подвижные (передвижные). Подразделяются на напольные, подвесные (перемещаются по поднятому рельсовому пути) и встраиваемые в другое оборудование (например, в обслуживаемый

станок) и т. д. Подвижность робота определяется наличием или отсутствием у него устройства передвижения.

### **3.3 Робототехнические комплексы**

Термин «робототехнические системы» (РТС) означает технические системы любого назначения, в которых основные функции выполняют роботы. Это гибкие производственные системы, в которых автоматически действующие машины, устройства, приспособления реализуют всю технологию производства, за исключением функции управления и контроля, осуществляемых человеком.

Несмотря на непрерывное расширение сферы применения мехатронных систем (МС) основной областью их применения по-прежнему пока остается промышленность и, прежде всего, машиностроение и приборостроение. Здесь появились первые средства автоматизации и сосредоточено до 80% всего мирового парка робототехнических средств. В машиностроении промышленные роботы подразделяются на технологические, которые выполняют основные технологические операции, и вспомогательные, занятые на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования. Технологические комплексы с такими роботами называются роботизированными технологическими комплексами (РТК).

В машиностроении до 80% продукции относится к серийному и мелкосерийному производству. Для быстрого перехода с одной модели изделия на другую, в соответствии с требованием рынка, создаются гибкие автоматизированные производственные системы (ГПС). ГПС – это система станков и механизмов, предназначенных для обработки различных конструктивно и технологически сходных деталей небольшими партиями или поштучно без непосредственного участия человека. Составными частями ГПС являются подсистемы: технологическая, транспортно-накопительная, инструментального обслуживания и автоматизированного управления с помощью ЭВМ.

В зависимости от количества станков в ГПС различают: гибкий производственный модуль (ГПМ); гибкую производственную линию (ГПЛ); гибкий производственный участок (ГПУ); гибкое производство цеха (ГПЦ) и завода (ГПЗ).

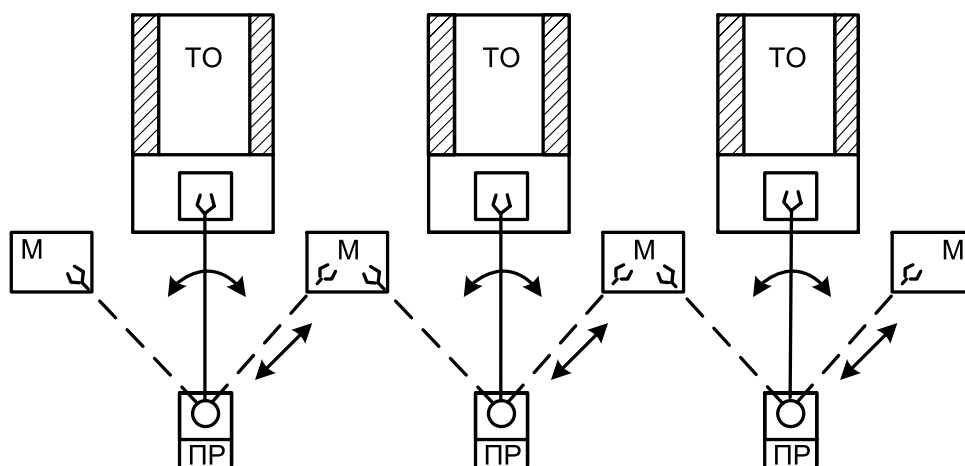
Гибкий производственный модуль – это технологическая единица оборудования (один-два станка с ЧПУ), оснащенных механизмами автоматической смены инструмента, автоматической смены заготовок и транспортирования их со склада до зоны обработки с помощью различных транспортных средств, например самоходных роботизированных тележек. Этот комплекс связан с единым математическим обеспечением, способствующим работе оборудования в автоматическом режиме с минимальным участием человека. Главная особенность ГПМ – возможность работы без участия человека и способность встраиваться в систему более высокого ранга. Гибкая линия состоит из нескольких модулей, оборудованных транспортной и инструментальной системами и управляемых микроЭВМ. Гибкий участок – разновидность ГПЛ; он отличается составом и взаимозаменяемостью технологического оборудования и видом транспорта. Гибкие модуль, линия, участок, представляющие собою самостоятельные производственные подразделения с взаимосвязанным технологическим оборудованием, являются основными звеньями для построения гибких производств более высокого порядка (цеха, завода).

Таким образом, в ГПС функционируют два потока ресурсов: материальный и информационный. Материальный поток обеспечивает выполнение всех основных и вспомогательных операций процесса обработки предметов: подачу заготовок и инструмента и установку их на станках; механическую обработку деталей; снятие готовых деталей и перемещение их на склад; замену инструмента и его перемещение; контроль обработки и состояния инструмента; уборку стружки и подачу смазочно-охлаждающей жидкости. Информационный поток обеспечивает: очередность, сроки и количество обрабатываемых предметов, предусмотренные планами работы ГПС; передачу программ обработки непосредственно исполнительным органам станков, программ работы роботов, установочных и переключательных механизмов, программ обеспечения заготовками, инструментом, вспомогательными материалами, программ управления всем комплексом и учета его работы, а также групповое управление станками, транспортно-накопительными механизмами, системой инструментального обслуживания.

На рис. 3.1 показан пример простой линейной компоновки однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с непосредственной связью между составляющими линию ячейками. В ней отсутствует межоперационная транспортная



система, а предметы производства передаются от одной ячейки к другой непосредственно входящими в них вспомогательными ПР. Такие линии с непосредственной жесткой связью между ячейками просты, однако требуют строго определенного взаимного расположения основного технологического оборудования.



ТО – основное технологическое оборудование;  
ПР – промышленный робот; М – магазин поштучной выдачи заготовок

Рис. 3.1. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой:

Данная компоновка характерна для технологических процессов с малым циклом обработки предметов производства на технологическом оборудовании (единицы, десятки секунд), что свойственно, в частности, процессам холодно-листовой штамповки. Для технологических процессов с большей длительностью обработки на технологическом оборудовании часто применяют другой тип построения комплексов с обслуживанием одним ПР нескольких единиц технологического оборудования.

На рис. 3.2 показан вариант такого комплекса с круговой компоновкой, в котором один ПР обслуживает 3 металлорежущих станка, расположенных вокруг него.

По мере совершенствования МС происходит устойчивый рост доли ПР, применяемых на основных технологических операциях. Хотя внедрение ПР на основных промышленных операциях требует значительно больших (в 3-4 раза) затрат, чем на вспомогательных операциях, именно здесь достигается наибольшая эффективность применения ПР при высвобождении рабочих мест. Велик и социальный эффект в связи с вредностью для человека ряда таких операций

(например окраска, сварка) или их монотонностью (например, сборка на конвейере). В машиностроении основными типами технологических комплексов в которых ПР получили распространение на основных операциях, являются комплексы сборки, сварки, нанесения покрытий, шлифования, зачистки, клепки.

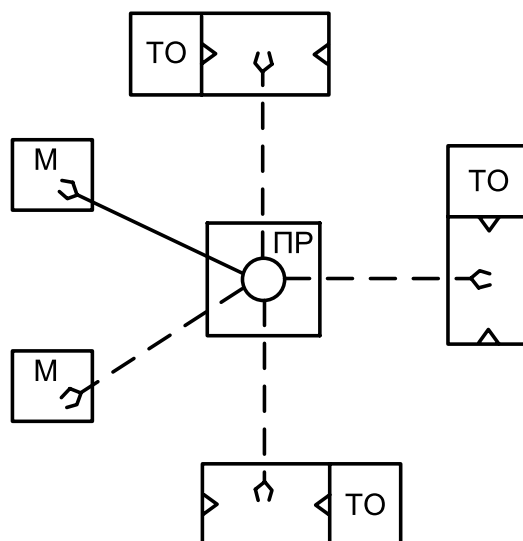


Рис. 3.2. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с круговой компоновкой

**Сборочные робототехнические комплексы.** Этот тип робототехнических комплексов по своему значению является, пожалуй, наиболее важным. Сборочные операции в машиностроении составляют до 40% себестоимости изделий, а в приборостроении больше – до 50–60%. Вместе с этим, степень автоматизации сборочных работ сегодня весьма низка в связи с ограниченными возможностями, которые имеют здесь традиционные средства автоматизации в виде специальных сборочных автоматов. Поэтому создание гибких сборочных комплексов на ПР является одним из основных направлений в автоматизации сборочных операций.

К сборочным операциям в приборостроении относятся механическая сборка, электрический монтаж, микроэлектронная сборка. Процесс сборки состоит из следующих последовательных взаимосвязанных операций:

- загрузка собираемых деталей в загрузочные и транспортные устройства (обычно с их ориентацией);
- перемещение деталей к месту сборки;
- базирование, т. е. фиксация в строго определенной позиции, с ориентацией деталей на сборочной позиции;

- собственно операция сборки, т. е. сопряжения деталей, включая закрепление;
- контрольно-измерительные операции в ходе сборки;
- удаление собранного узла со сборочной позиции для перемещения на следующую позицию, если сборка не закончена.

Для выполнения механической обработки, не связанной со сверхвысокими силовыми режимами резания часто применяют промышленных роботов, непосредственно выполняющих процесс обработки – как бы ручная работа в исполнении роботов (рис. 3.3).

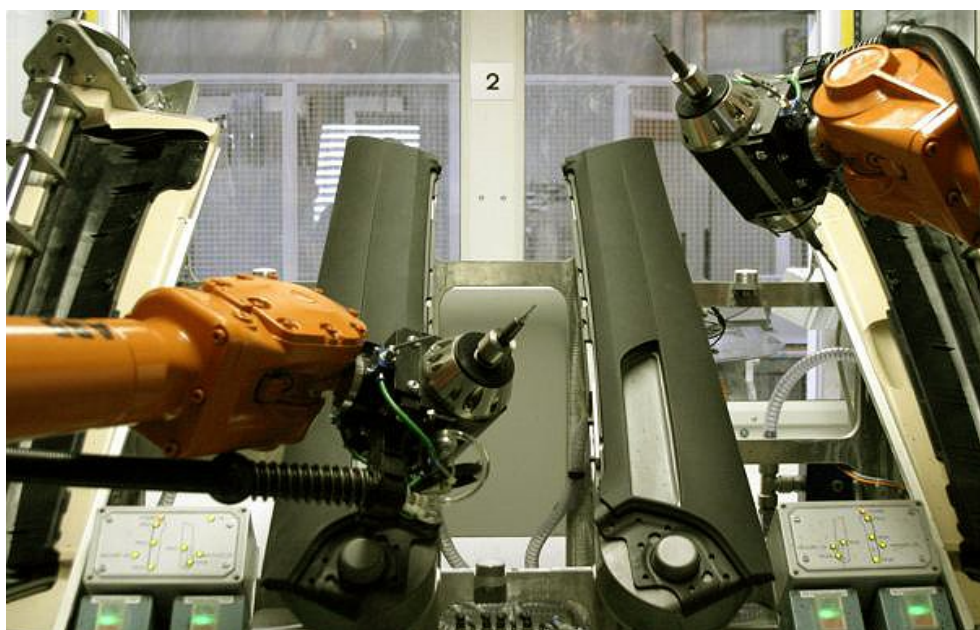


Рис. 3.3. Фрезерование облицовочных панелей в робототехническом комплексе двумя роботами

Особенно роботы эффективны при работе с крупногабаритными заготовками, сложными контурами и прочими задачами, где антропоморфная кинематика развивает свои максимальные преимущества.

Например, обработка пластмассовых деталей автомобильной промышленности требует тщательной детализации при проектировании комплексов, точного изготовления и монтажа, а также определенной гибкости при вводе в эксплуатацию.

Применение 3D системы offline-программирования, планирования и моделирования, а также привлечение ведущих специалистов и производителей вспомогательного робототехнического оборудования дает возможность производить робототехнические комплексы, ориентированные на нужды и пожелания заказчиков.

Робототехнические комплексы фрезерования известны своим эталонным качеством на рынке гибких решений процессов резки в робототехнике.

В качестве режущего инструмента, как правило, применяют осевой инструмент, высокооборотистые фрезы, лазерные, плазменные технологии.

Широко применяются робототехнические комплексы на операциях сварки, особенно электроконтактной сварки в автомобилестроении. На рис. 3.4 показан цех сварки кузова Hyundai Solaris на автоборочном заводе в Санкт-Петербурге.



Рис. 3.4. Сварочный цех по сборке автомобильных кузовов

**В системе гражданской защиты** гибкие производственные системы применяются для выполнения работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций в условиях, опасных для жизни людей. Состав комплексов: шасси, манипулятор, передвижной пульт управления, система теленаблюдения, система подсветки, система химической разведки (МРК-27Х), система радиационной разведки (МРК-45, МРК-46), комплект сменного технологического оборудования. Назначение робототехнических комплексов, применяемых в системе гражданской защиты:

– разведка территории и объектов с наличием взрывоопасных предметов (ВОП), идентификация и осмотр ВОП, определения их состояния, выполнение вспомогательных операций при обезврежи-



вании ВОП и других опасных предметов (радиационные, химические и токсичные вещества);

- проведение пиротехнических работ, включая поиск, обезвреживание и транспортировку взрывоопасных предметов и боеприпасов, ведение разведки внутри помещений и на местности;

- проведение аварийно-спасательных и специальных работ в условиях химического загрязнения, визуальный осмотр объекта, инструментальная приборная разведка и определение уровней загрязнения воздуха, отбор проб, в т.ч. грунта и воды, выполнение технологических операций по локализации источника загрязнения;

- ведение радиационной разведки, дозиметрического контроля местности;

- обозначение зараженной зоны;

- обнаружение и ликвидация источников повышенной радиации;

- сбор, размельчение, контейнирование и транспортирование опасных предметов;

- отбор проб грунта и жидкости.

На рис. 3.5 показана операция сварки роботом сборочного узла легкового автомобиля на АвтоВАЗе.

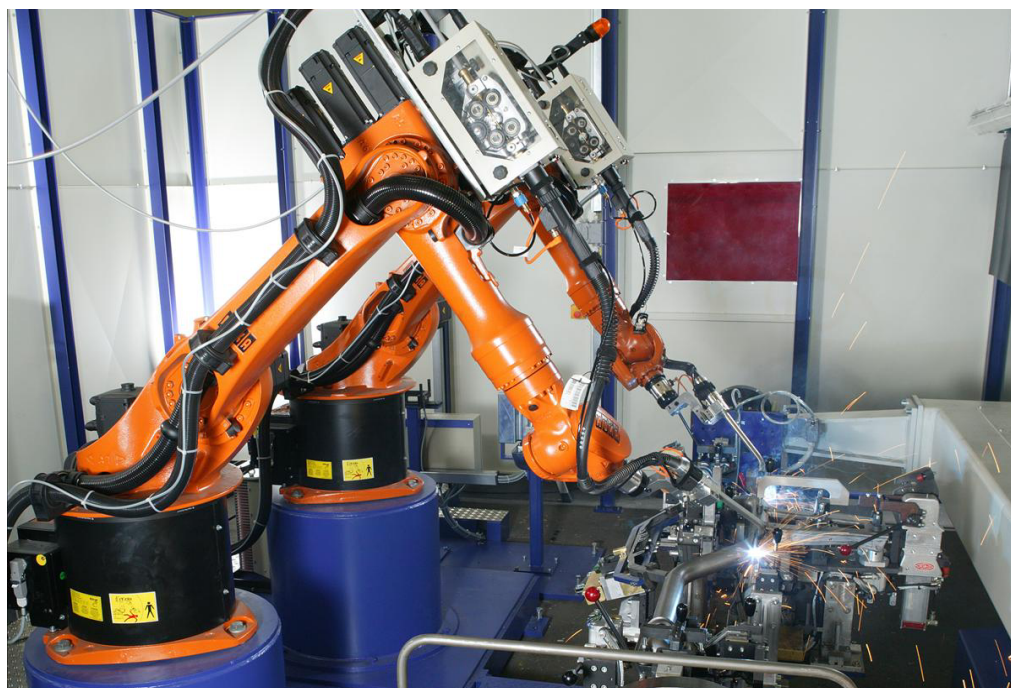


Рис. 3.5. Выполнение роботом операции сварки

МРК-2 применяется при дозиметрическом контроле на объектах хранения отработанного ядерного топлива. Его назначением является

проведение инспекционных проверок и аварийно-спасательных работ. Он способен выполнять визуальную разведку; газовую, химическую, радиационную разведку местности, а также проводить аварийно-спасательные работы.

На рис. 3.6 показан робот-пожарник, проводящий спасательную операцию во время антитеррористических учений (работал как с макетами, так и настоящими людьми, изображающими жертв теракта).



Рис. 3.6. Робот производит спасательную операцию (г. Токио)

### ***3.4 Мехатроника в медицине***

В настоящее время бурно развиваются высокие медицинские технологии. 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. 3.7.

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.

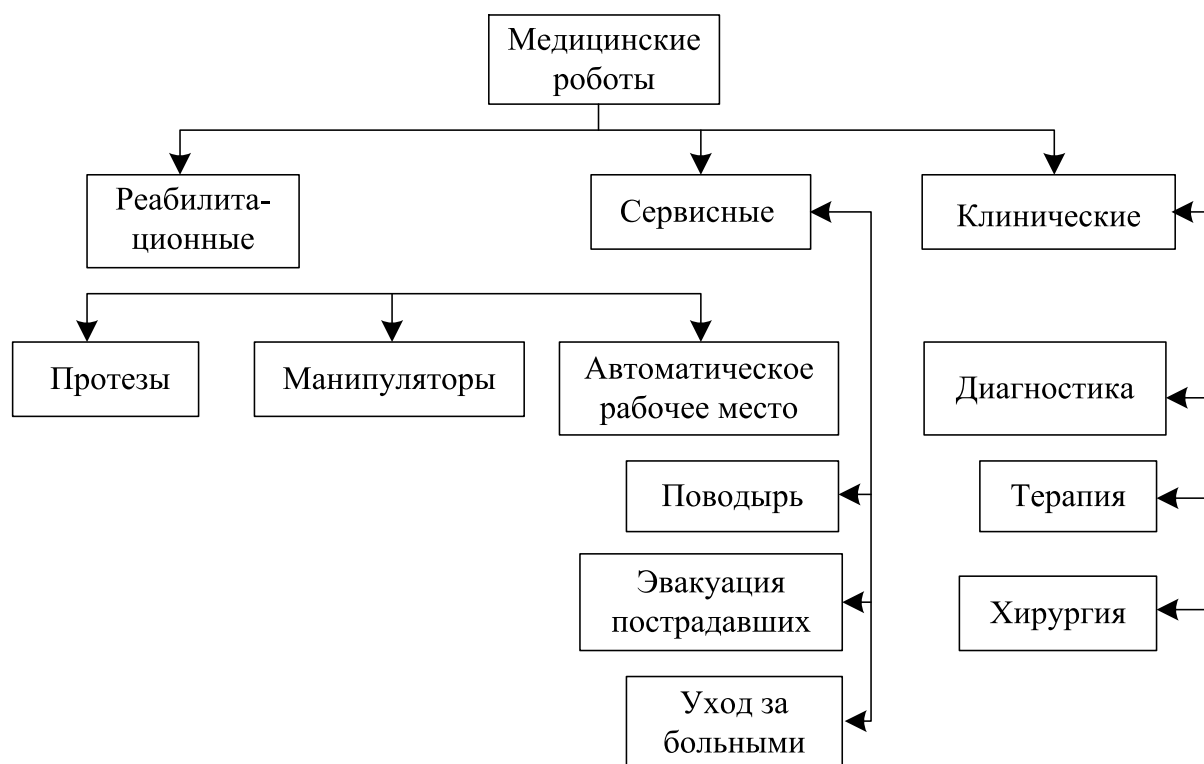


Рис. 3.7. Основные направления развития медицинской мехатроники

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.

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.

Такие мероприятия обеспечивают пациентам возможность общения друг с другом и способствуют их осознанию себя как полноправного члена общества.

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 робо-



том, 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.

### **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 медперсоналу. Он оснащен сенсорной системой.

В Великобритании разрабатывается роботизированное устройство, способное выполнять операции по переворачиванию лежащих 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 датчи-

ков бортовая ЭВМ робота вырабатывает стратегию преодоления препятствий. Робот – поводырь управляет движением слепого пациента с помощью элементов связи.

Внедрение транспортных мобильных роботов в инфраструктуру медицинских учреждений 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 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.

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. Предполагается, что массовое появление медицинских приборов различного назначения, управляемых ЭВМ, окажет сильное влияние на врачебную практику.

Ряд существующих **диагностических систем** с изображением на экране исследуемой области (например, томографический прибор, управляемый от ЭВМ), уже использует элементы мехатроники и робототехники.

Существует несколько разновидностей **компьютерных томографов**, отличающихся видом энергии, используемой для получения изображения внутренних органов (здесь рассмотрен рентгеновский томограф).

Томограф создает цифровое изображение путем измерения интенсивности рентгеновских лучей, прошедших через тело во время вращения рентгеновской трубки вокруг пациента. Коэффициент поглощения веерного пучка рентгеновских лучей в объекте измеряется с помощью набора из нескольких сотен или нескольких тысяч рентгеновских детекторов (обычно твердокристаллических). Детекторы собирают информацию в каждой из проекций, которая затем оцифровывается и анализируется компьютером. На основе полученных данных компьютер реконструирует поперечное изображение органа. Это изображение имеет целый ряд преимуществ перед обычным рентгеновским снимком, включая возможность выбора нужной проекции, а также высокую способность к передаче низкоконтрастных объектов, которая у компьютерных томографов значительно выше, чем у других методов построения рентгеновского изображения.

Рентгеновские томографы состоят из следующих основных частей: сканирующего устройства, рентгеновской системы, механизма поворота рентгеновской трубки, пульта управления и ЭВМ.

Сканирующее устройство представляет собой круговую рамку, в которую вмонтированы вращающаяся рентгеновская трубка и большое количество воспринимающих детекторов. При томографии неподвижного объекта рентгеновская трубка при помощи специального привода совершает круговое движение внутри рамки, при этом излучается тонкий пульсирующий пучок рентгеновского излучения, проходящий через объект под разными углами. Прошедшее через мягкие ткани рентгеновское излучение регистрируется воспринимающими датчиками, информация с которых поступает для обработки в ЭВМ. При этом рассчитываются коэффициенты поглощения рентгеновского излучения в каждой точке среза. После сложной

математической обработки принятой информации получают плоское изображение изучаемого среза органа.

Рентгеновская система состоит из трубки и генератора. Рентгеновская трубка работает в импульсном режиме с частотой импульсов 50 Гц при напряжении 100-130 кВ. Трубка имеет двойное охлаждение: сама трубка охлаждается маслом, масло в свою очередь охлаждается водой или вентилятором. Трубка питается от высоковольтного генератора, работающего в импульсном режиме.

Пульт управления является важным звеном компьютерного томографа. Он непосредственно связан со сканирующей системой и ЭВМ. В состав пульта входят два видеомонитора, один из которых текстовый, а другой предназначен для изображения срезов. Программа сканирования определяет толщины срезов и их количество, скорость сканирования шаг томографирования, количество снимков и др. С помощью светового пера врач может в цифровом виде получить информацию об оптической плотности интересующей его области среза, измерить расстояния между заданными точками изображения среза для оценки размера органа или патологического очага.

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 при проведении замены нескольких дорогостоящих стационарных радиоактивных источников в многолучевых установках в целях понижения уровня радиационной опасности для медицинского персонала. Проводятся также 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 примером 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 трехмерной 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.

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.

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.

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. Система включает артериальный носитель – микроробот, способный перемещаться по кровеносному руслу и оснащенный ультразвуковым микродатчиком, а также необходимым рабочим инструментом.

В Канаде проводятся экспериментальные исследования телеоператора-робота для лапароскопических операций.

На рис. 3.8 показано, как хирурги при помощи робота по имени Да Винчи делают операцию по удалению грыжи в университетской клинике в Женеве, Швейцария. В 2008 году было открыто отделение для роботизированной хирургии, где до 80 хирургов из разных стран мира имели возможность опробовать такой метод.



Рис. 3.8. Хирургическая операция при участии робота



Отметим, что клинические робототехнические системы являются эргатическими т.е. функционируют при участии оператора. Такие робототехнические системы позволяют не только отказаться в ряде случаев от традиционных медицинских технологий, но и существенно облегчить условия труда хирурга и врача-диагноста.

На рис. 3.9 показан доктор Клиффорд (уролог) за штурвалом робота да Винчи в больнице города Милтон штата Массачусетс.



Рис. 3.9. Доктор-уролог за штурвалом робота

Система робота состоит из трех основных частей – панель управления для работы оператора-врача, где сосредоточено основное управление роботом, приборная доска и основной модуль – операционная панель с 4-мя манипуляторами.

Медицинская мехатроника находится в состоянии быстрого подъема, темпы которого значительно выше, чем в традиционных областях мехатроники. Но есть факторы, сдерживающие применение мехатронных устройств в медицинской практике.

Важнейшим среди них является психологический фактор, вызывающий 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.

**Искусственное сердце.** Сегодня не удастся полностью удовлетворить потребность в донорском сердце, поэтому актуальной остается задача по созданию автономных портативных имплантируемых устройств типа «искусственное сердце». Такие устройства состоят из источника питания и движителя-преобразователя, к которому часто добавляется промежуточный преобразователь движений, обеспечивающий передачу энергии на рабочий или исполнительный орган, и компьютерной системы управления, регулирующей работу устройства.

### ***3.5 Периферийные устройства компьютеров как мехатронные объекты***

Периферийными устройствами компьютера (устройствами ввода – вывода или внешними устройствами) называются устройства, с помощью которых в ЭВМ вводится информация для ее последующей обработки, а также выводятся промежуточные и окончательные результаты ее обработки в форме, доступной для восприятия человеком и использования для управления объектами. Такие устройства представляют собой блоки, внешние по отношению к процессору.

Некоторые периферийные устройства компьютера содержат только электронные узлы и компоненты (мониторы, модемы, звуковые карты, дополнительные блоки оперативной памяти, интерфейсы для связи с объектами управления). Некоторые из них кроме электронных систем имеют простейшие механические узлы (клавиатура, мышь), а часть имеют сложную механическую систему со своим микропроцессорным управлением (принтеры, плоттеры, дисковые устройства, накопители информации на оптическом диске). Последние для обеспечения точности, и быстродействия работы механических узлов снабжены большим количеством аналоговых и цифровых датчиков и зачастую интеллектуальными системами управления. Такие устройства являются типично мехатронными объектами.



Одним из наиболее сложных мехатронных объектов среди периферийных устройств компьютеров является накопитель информации на оптическом диске. Типовой CD-дисковод состоит из платы электроники, шпиндельного двигателя, механической системы оптической считывающей головки и механизма загрузки диска.

На плате электроники размещены все управляющие схемы дисководов, интерфейс с контроллером, разъемы интерфейса и двухконтактный разъем выхода звукового сигнала.

Шпиндельный двигатель служит для приведения диска во вращение с постоянной или переменной линейной скоростью. Сохранение постоянной линейной скорости требует изменение угловой скорости диска в зависимости от положения оптической головки. При поиске фрагментов он может вращаться быстрее, чем при считывании данных, поэтому двигатель обладает хорошей динамической характеристикой.

На оси шпинделя закреплена ферромагнитная подставка, поверхность которой обычно покрыта резиной или мягким пластиком для предотвращения проскальзывания компакт-диска. После загрузки диск прижимается к подставке с помощью расположенной сверху шайбы с постоянным магнитом.

Система оптической головки включает саму головку и механизм ее перемещения. В головке размещены: излучатель, выполненный на основе инфракрасного лазерного светодиода, устройство фокусировки, фотоприемник и предварительный усилитель. Устройство фокусировки представляет собой подвижную линзу, приводимую в движение электромагнитной катушкой, которая аналогична применяемой в громкоговорителе. С изменением напряженности магнитного поля линза сдвигается и происходит перефокусировка лазерного луча. Благодаря малой инерционности такая система эффективно отслеживает вертикальные биения диска. Точность фокусировки  $\pm 1$  мкм (при диаметре светового пятна 0,9 мкм).

Механизм перемещения оптической головки имеет собственный двигатель, приводящий в движение каретку с головкой посредством зубчатой либо червячной передачи. Для исключения люфта предусмотрено соединение с начальным напряжением (для червячной передачи это подпружиненные половины ведомой шестерни). Точность перемещения по координате трекинга (по радиусу) – 0,1 мкм.

Устройство загрузки диска может выполняться с использованием выдвижного лотка и загрузка путем прямой вставки диска в приемную щель накопителя. Во всех этих случаях накопитель содержит двигатель для втягивания-выдвижения лотка, а также устройство для перемещения рамы, на которой закреплена вся механическая часть вместе со шпинделем и приводом оптической головки, в рабочее положение, когда диск ложится на подставку.

Система управления построена на однокристальной микроЭВМ, которая контролирует и координирует работу всех устройств накопителя CD-ROM, выдавая команду на выполнение следующей операции только после успешного завершения предыдущей.

### ***3.6 Мехатронные системы в быту***

Бытовые (домашние) роботы предназначены для автоматизации различных операций как непосредственно в быту человека, так и в сфере обслуживания. Эти роботы призваны реализовать важнейшую социальную задачу общества – высвобождение времени человека для духовной жизни.

Создание бытовых роботов – весьма сложная научная и инженерная задача, так как здесь необходимы гибкие универсальные системы, т.е. очувствленные роботы с элементами интеллекта, способные самостоятельно выполнять различные, на первый взгляд простые работы – приготовление пищи, мытье посуды, уборку помещений, шитье и ремонт одежды, уход за детьми, обучение различным навыкам, развлечение людей и пр., но совершенно не поддающиеся жесткой регламентации. Особую роль играют робототехнические и кибернетические системы, обеспечивающие безопасность и контроль состояния жилища (так называемый «Умный дом»).

Среди хорошо разработанных и прочно вошедших в нашу домашнюю жизнь мехатронных систем можно отнести стиральные машины с микропроцессорным управлением, которые на основе анализа загрязненности белья самостоятельно выбирают режимы работы, музыкальные центры с множеством сервисных функций, интеллектуальные кондиционеры, выбирающие режимы работы в зависимости от времени суток, количества находящихся в помещении людей, температуры наружного воздуха и состава воздуха внутри помещения, фотоаппараты и многое другое.

## **3.7 Транспортные мехатронные системы**

### *3.7.1 Мехатронные системы на автотранспорте*

Жесткая конкуренция на автомобильном рынке вынуждает специалистов в этой области к поиску новых передовых технологий.

Мехатронные модули находят все более широкое применение в различных транспортных системах. Современный автомобиль так начинен мехатронными устройствами, что его можно считать мехатронной системой (МС) (рис. 3.10).

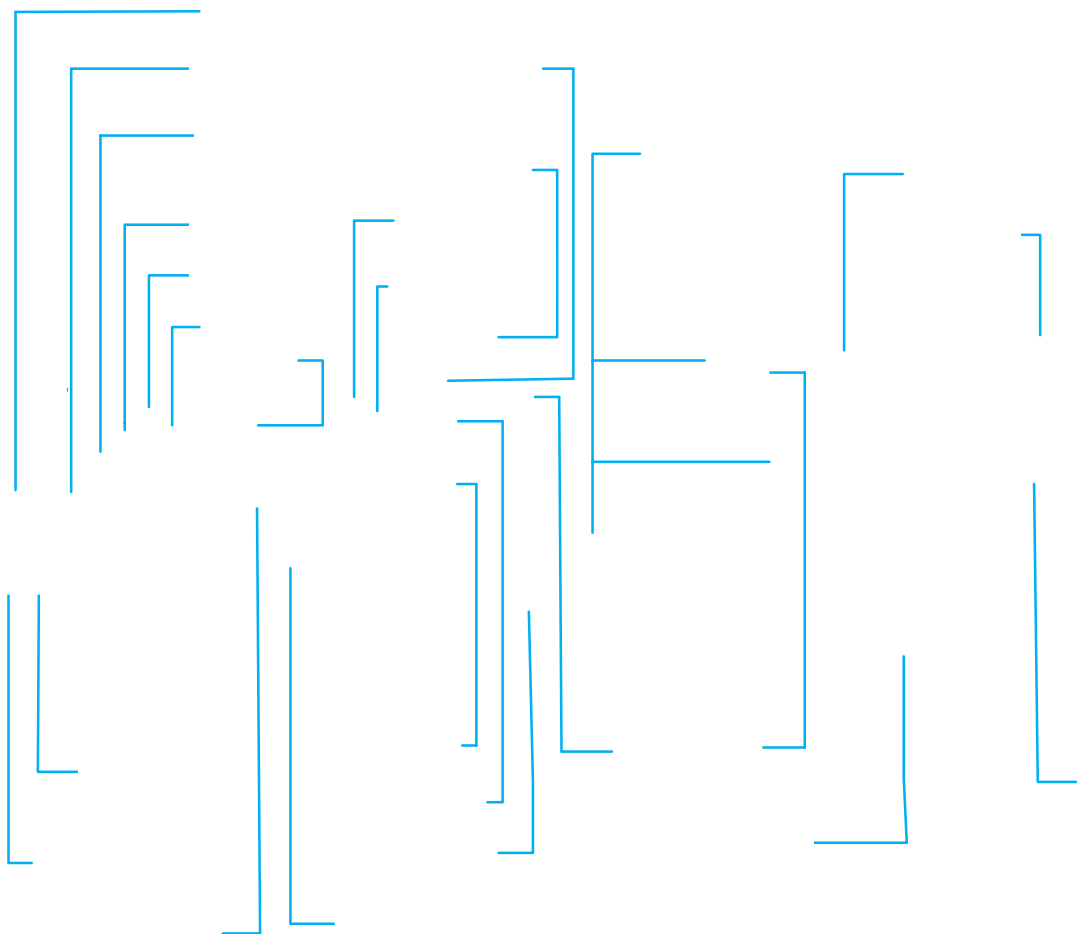


Рис. 3.10. Автомобиль как мехатронная система

Современная автомобильная МС включает, как правило, целый ряд подсистем, выполняющих функции:

- управления двигателем;
- управления коробкой передач;
- обеспечения безопасности движения (тормоза, диагностика, подвеска, подушки безопасности, круиз-контроль, система навигации);

– обеспечения комфорта (климат-контроль, автоматическое управление аудио- и видеосистемами).

Одни из них призваны оптимизировать конструкцию автомобиля и наиболее рационально использовать его внутренние ресурсы. То есть, оптимизировать внутреннюю среду автомобиля. Это, например, система управления работой двигателя, электронной системы питания автомобиля, управления коробкой передач, система торможения, обеспечения комфорта и др.

Автомобиль становится автомобилем тогда, когда он движется. В это время внешняя среда активно меняется – меняется скорость движения, конфигурация дороги, качество покрытия, появляются препятствия на проезжей части, меняется погода, освещенность и т.д. Автомобиль должен адаптироваться к изменениям этих условий, своевременно на них реагировать, от этого зависит безопасность движения. Для этого современные автомобили оснащаются многими датчиками и мехатронными устройствами, например система навигации.

Эти две категории устройств – система оптимизации внутренней среды автомобиля и система адаптации к условиям внешней среды – безусловно, связаны между собой.

Внедрение в автомобиль электроники, по сути, начали с самого ответственного участка – тормозов.

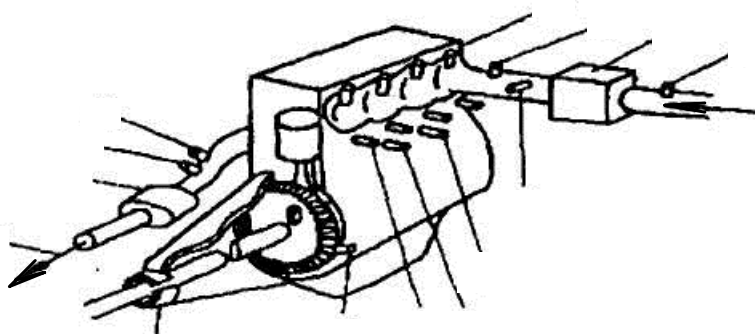
В далеком 1970 году совместная разработка «Бош» и «Мерседес-Бенц» под скромной аббревиатурой АБС (антиблокировочная система тормозов) совершила переворот в активной безопасности. Антиблокировочная система не только обеспечила управляемость машины с нажатой «в пол» педалью, но и позволила создать несколько смежных устройств – например, систему тягового контроля (TCS, ESP). Идея была впервые реализована еще в 1987 году одним из лидеров разработки бортовой электроники – фирмой «Бош».

По сути, тяговый контроль – антипод АБС: последняя не дает колесам скользить при торможении, а TCS – при разгоне. Электронный блок отслеживает тягу на колесах посредством нескольких датчиков скорости. Стоит водителю сильнее обычного «топнуть» по педали акселератора, создав угрозу проскальзывания колеса, устройство попросту «придушит» двигатель.

Через несколько лет была создана ESP – программа курсовой устойчивости (Electronic Stability Program). Оснатив автомобиль

датчиками угла поворота, скорости вращения колес и поперечного ускорения, тормоза заставили помогать водителю в наиболее сложных ситуациях. Подтормаживая то или иное колесо, электроника сводит к минимуму риск сноса машины при быстром прохождении сложных поворотов.

**Система управления работой двигателя** обеспечивает регулирование угла опережения зажигания, состава рабочей смеси, степени рециркуляции отработавших газов, изменение количества цилиндров, в которые подается, топливо, и т.д. (рис. 3.11). Параметрами управления являются: скорость вращения коленчатого вала, разрежение во впускном трубопроводе, температура охлаждающей жидкости, скорость движения автомобиля и некоторые другие.



1 – датчик выходного момента; 2 – датчик контроля выхлопа; 3 – катализатор; 4 – датчик контроля загрязнителей в выхлопе (СО и др.); 5 – датчик состава смеси газ-кислород в выхлопе; 6 – датчик контроля впрыска топлива; 7 – датчик давления воздуха во впускной трубе; 8 – массовый расходомер (датчик потока воздуха); 9 – датчик температуры воздуха на входе; 10 – датчик положения дросселя; 11 – датчик детонации (стука); 12 – датчик температуры системы охлаждения двигателя; 13 – датчик контроля сгорания смеси в цилиндре; 14 – датчик скорости

Рис. 3.11. Основные точки расположения датчиков в автомобильном двигателе

Главной задачей этой системы является установление оптимального режима зажигания и впрыска топлива в целях обеспечения экономичности работы с учетом состава выхлопных газов.

Датчик температуры охлаждающей жидкости выполнен на базе термистора и помещен в герметичный латунный корпус.

Частота вращения коленчатого вала и текущее положение поршня определяются с помощью датчика, состоящего из зубчатого колеса из ферромагнитного материала, закрепленного на коленчатом валу, и индукционного преобразователя с постоянным магнитом. Конструкция преобразователя позволяет устанавливать начало момента зажигания.

В режиме работы система определяет оптимальный момент зажигания на основании информации датчиков, поступающей в микропроцессор.

**Система управления коробкой передач.** Коробка передач сопрягает двигатель с нагрузкой, поэтому управление коробкой передач интегрировано с управлением двигателем. Для этого требуются датчики скорости двигателя, выходной скорости коробки передач или скорости машины и при гидравлическом управлении передачей датчики положения гидравлических клапанов и давления масла. Для измерения скорости машины используется индуктивный датчик в коробке передач, от которого поступает входной сигнал для электронного спидометра. При использовании шаговых двигателей в качестве исполнительных механизмов для гидравлических клапанов, специальных датчиков не требуется. В случае необходимости на конце штока клапана устанавливается электромагнитный или оптический датчик. Для измерения давления в гидравлических системах автомобиля применяются мембранные датчики.

На вход микропроцессорной системы управления коробкой передач подаются команды водителя и сведения о режиме работы автомобиля. Водитель, управляя пятипозиционным рычагом переключения передач, подает одну из следующих команд: начало движения, автоматический режим, 3-я передача, 4-я передача, задний ход. В систему управления поступают сигналы о скорости движения автомобиля, о давлении в гидросистеме, о передаче, включенной в текущий момент времени. При ошибочных действиях водителя, которые могут привести к поломке коробки передач, команда водителя не выполняется. Процессор управляет работой сцепления, механизмом переключения передач, тормозным устройством для снижения частоты вращения коленчатого вала двигателя. Электронный блок вычисляет относительные угловые скорости валов коробки передач и выдает команду на включение в зацепление соответствующих шестерен с помощью гидравлических исполнительных механизмов.

Система выполняет также функцию диагностики: при какой-либо неисправности загорается сигнальная лампочка на передней панели.

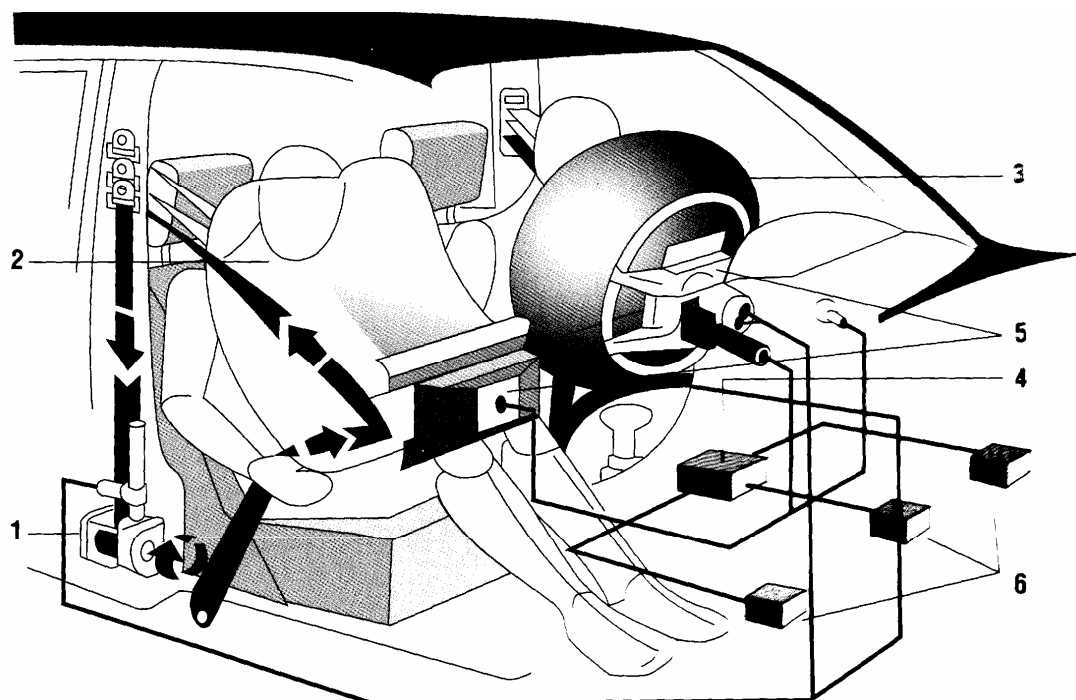
Одной из основных особенностей развития электронных систем управления коробками передач на современном этапе является использование в качестве критерия оптимальности параметров, характеризующих топливную экономичность автомобиля. Плавное переключение передач, управляемое микропроцессором, позволяет экономить до 30% топлива.

Система управления подвеской обеспечивает мягкую езду при малых скоростях движения по прямой и жесткую езду при движении с высокой скоростью. Малые динамические колебания нагрузок на колеса достигаются с помощью сильного демпфирования колебаний, малой массы оси колес и мягких покрышек. Согласование подпружинивания и демпфирования колебаний определяется компромиссом между комфортом и безопасностью движения.

Для реализации переменного демпфирования многочисленные датчики системы непрерывно оценивают величины, характеризующие условия движения: скорость движения, угол поворота рулевого управления и дроссельного клапана, вертикальное и горизонтальное ускорение корпуса и осей, перемещения пружин, нагрузку на тормоза. Все данные от датчиков во время движения обрабатываются в электронном устройстве и сравниваются с граничными значениями, хранящимися в ЗУ. Электроника обеспечивает также согласование гидравлического воздействия демпферов с условиями движения, в течение миллисекунд происходит настройка характеристик демпфирования и управления телескопическими амортизаторами. Переключение мягкого и твердого демпфирования происходит в течение 20 мс. Система осуществляет контроль помех и при обнаружении ошибок автоматически переводит амортизаторы в жесткое положение безопасного движения, одновременно сигнальная лампа указывает на помехи.

Одной из составных частей системы безопасности автомобиля является подушка безопасности (airbag) (рис. 3.12), элементы которой размещены в разных частях автомобиля. Инерционные датчики, находящиеся в бампере, у моторного щита, в стойках или в районе подлокотника (в зависимости от модели автомобиля), в случае аварии посылают сигнал на электронный блок управления. В большинстве современных СКБА фронтальные датчики рассчитаны на

силу удара на скорости от 50 км/ч. От электронного блока управления сигнал следует на основной модуль, который состоит из компактно уложенной подушки, соединенной с газогенератором. Последний представляет собой таблетку диаметром около 10 см и толщиной около 1 см с кристаллическим азотгенерирующим веществом. Электрический импульс поджигает в «таблетке» пиропатрон или плавит проволоку, и кристаллы со скоростью взрыва превращаются в газ. «Средняя» подушка наполняется за 25 мс. Поверхность подушки европейского стандарта мчится навстречу грудной клетке и лицу со скоростью около 200 км/ч, а американского – около 300. Поэтому производители машин настоятельно советуют пристегиваться и не сидеть вплотную к рулю.



1 – натяжное устройство ремня безопасности; 2 – надувная подушка безопасности; 3 – надувная подушка безопасности; для водителя; 4 – блок управления и центральный датчик; 5 – исполнительный модуль; 6 – инерционные датчики.

Рис. 3.12. Автомобильная подушка безопасности

В современном легковом автомобиле фирмы «Мерседес Бенц» около сорока управляющих блоков, заведующих всеми системами автомобиля, объединены при помощи цифровых шин передачи данных в одну большую сеть, по которой передается 850 различных



типов данных и производится управление порядка 170 различными функциями бортовых устройств.

Для обеспечения бесперебойной работы используются 14 антенн, 11 из них служат для приема телевизионных и радиопередач (процессор выбирает антенну, обеспечивающую наилучшие в данный момент условия приема), две – для управления центральным замком и предпусковым подогревателем. Остальные антенны обслуживают навигационную систему, учитывающую при выборе оптимального маршрута передаваемую в RDS формате информацию о пробках, и мобильную связь, в том числе систему, которая самостоятельно вызывает аварийные службы в случае аварии, используя для этого встроенный сотовый телефон. Сам «мобильник» имеет голосовое управление.

Климатическая установка способна не только автоматически переключаться на рециркуляцию воздуха в салоне, если сенсоры фиксируют повышение концентрации выхлопных газов «за бортом», но и учитывает количество пассажиров в салоне, относительную влажность воздуха и даже положение солнца (понижает температуру воздуха, подаваемого в зоны салона, которые находятся на солнцепеке).

В подвесках автомобиля (независимые, многорычажные) используют стойки с амортизаторами и оригинальными пневмоподушками взамен пружин. Компрессор и управляющая электроника позволяют подавать сжатый воздух в каждую пневмостойку индивидуально и тем самым поддерживать уровень кузова независимо от загрузки, а также изменять по ходу дорожный просвет.

Перечисленные выше уже созданные элементы автоматизации снимают технические проблемы управления агрегатами автомобиля. Остаются проблемы ориентации и взаимодействия с внешней средой и обеспечения безопасности движения, предотвращения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Итогом работы в этой области стало создание системы комплексной безопасности автомобиля (СКБА). Для этого надо чтобы автомобиль «поумнел». Этому служат Интеллектуальные Транспортные Системы (ITS – Intelligent Transportation Systems). Почти десять лет издается международный журнал Transactions on Intelligent Transportation Systems. Подобные разработки разрушают сложившееся представление о том, что создание полноценного автомобиля-робота теоретически невозможно, поскольку эта задача относится к классу AI-complete («совершенный искусственный

интеллект»), то есть может быть решена, только если робот будет обладать интеллектом человека во всей его полноте. В случае, если интеллект робота уступает человеческому, всегда может возникнуть какая-то нештатная ситуация, в которой он окажется бессилён. С этой точкой зрения можно было бы согласиться, если бы не реальный интеллектуальный уровень многих современных водителей. Не вызывает сомнения, что если бы живые водители были столь же дисциплинированы, как и роботы, и не употребляли алкоголь и наркотики, а неизбежные несчастные случаи являлись бы только следствием нештатных ситуаций, оказавшимся роботам не под силу, то жертв на дорогах стало бы на порядки меньше.

Инициатива ITS стала возможной потому, что современный автомобиль активно роботизируется изнутри и сегодня оснащен целым рядом систем автоматизации. Помимо уже вошедших в обиход автоматических коробок передач, систем автоматической блокировки торможения и систем управления другими агрегатами плюс обычного круиз-контроля, существуют: система информирования о состоянии дорожного покрытия, особенно об оледенении; система адаптивного круиз-контроля, воспринимающая данные от систем обнаружения соседних автомобилей; система взаимного информирования автомобилей, снабженных системами GPS; средства слежения за дорожной разметкой; системы автоматизированной парковки; устройства для просмотра мертвых зон; системы контроля скорости на поворотах.

Но пока ITS, получившая значительное распространение во всем мире, все же исходит из действующей парадигмы «за рулем водитель». Логичным продолжением этого направления стали системы Internet для автомобилей. Каким бы совершенным ни был робот, он эффективнее работает во взаимодействии с себе подобными. В системах могут использоваться совместно действующие объекты, образующие то, что теперь называют «разумным роем».

С помощью существующей системы определения дорожной ситуации Floating Car Data (FCD), что переводится как «данные с движущегося автомобиля», автомобили посылают свои данные о местонахождении в определенный момент времени на центральный пульт движения, который сопоставляет получаемые сообщения с сообщениями других автомобилей, оснащенных FCD, с целью распознавания дорожных и нештатных ситуаций. Параллельно система

способна через систему-коммуникатор «Авто-Авто» предупреждать другие автомобили в зоне действия передатчика.

Ключевой системой беспилотного автомобиля-робота и ITS является интегрированная система, которая является бортовым компьютером, датчиками параметров движения и навигационной системой одновременно, постоянно связанным с себе подобными.

Интегрированная навигационная система решает следующие задачи:

- непрерывное определение координат в районах высотной городской застройки, в тоннелях, под мостами и путепроводами;
- более точное счисление координат по сравнению с GPS, за счет дополнительного оборудования;
- счисление координат и курса транспортного средства без запаздывания.

Что же такое упомянутое GPS? GPS – это аббревиатура от английского названия Global Positioning System, что означает «система глобального позиционирования» или «глобальная система определения координат». Это 24 космических спутника NavStar (запущены и принадлежат США) и миллионы приемников на поверхности Земли. Получив сигнал как минимум от трех спутников, мы можем вычислить координаты любой точки вблизи поверхности Земли. Чтобы проводить качественные вычисления, необходимо пользоваться очень точными часами, ведь расхождение во времени прохождения сигнала всего в 1 тысячную долю секунды даст ошибку местоположения около 300 км. На борту спутников установлены атомные часы. Каждый спутник имеет их в количестве 4, чтобы можно было гарантировать, что хотя бы одни работают обязательно. Ход бортовых часов спутника происходит с наносекундной точностью. А это  $10^{-9}$  секунды! Такая точность часов позволяет определять местоположение автомобиля с точностью до 3-5 м. GPS-приемник на автомобиле позволяет вычислять географические координаты на основе полученных данных.

Для ориентации в пространстве могут использоваться и другие разнообразные устройства, например, инфракрасные датчики, действующие на предельно близком расстоянии. Эти устройства хорошо известны. Менее известен так называемый «ладар», который иногда еще именуют «лидаром» от английского названия Light-Imaging Detection and Ranging. Ладар стал составной частью системы измере-

ния дистанции (Laser Measurement Sensor, LMS). Идея ладара не оригинальна: LMS излучает несколько лучей и воспринимает отраженные данные. Обладая в полной мере свойствами инерциальной навигационной системы с полным набором датчиков ориентации и перемещения (рис. 3.13), интегрированная система способна определять все параметры движения транспортного средства: угловые скорости, ускорения, ударные и вибрационные воздействия, перегрузки.

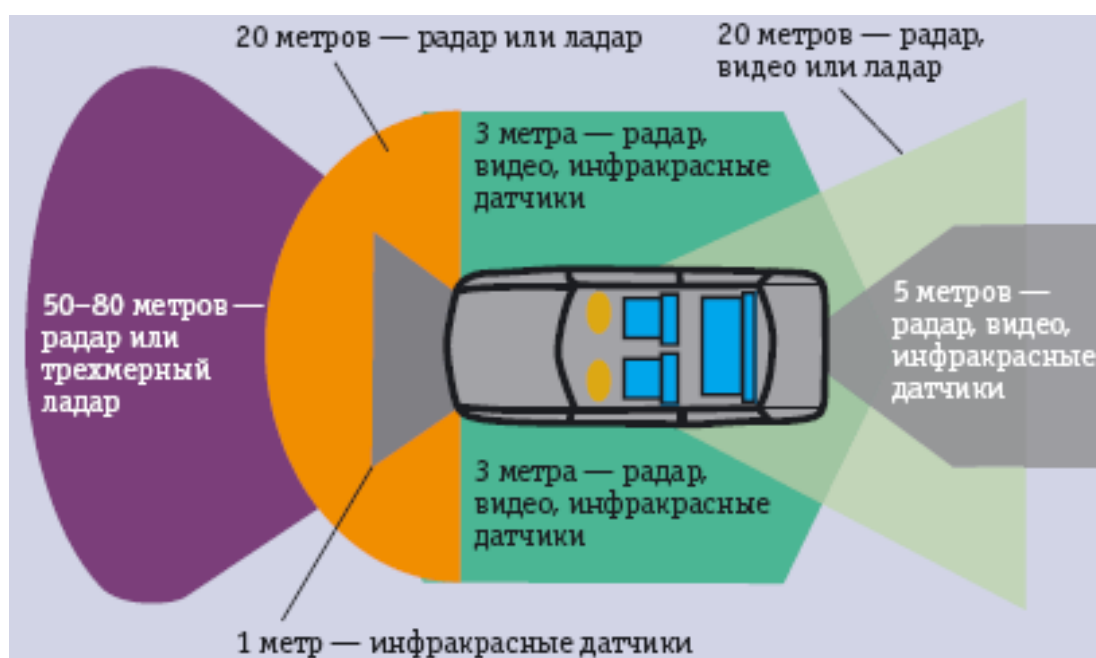


Рис. 3.13. Датчики ориентации в пространстве и дистанция их действия

При этом в отличие от традиционных блоков датчиков движения в интегрированной системе реализован сложный математический аппарат пересчета воздействий в различные системы координат. Поэтому потребитель может использовать выходную информацию системы непосредственно для своих приложений без предварительной обработки.

Будущее наступает. Сегодня создание беспилотного автомобиля-робота стало вполне возможно. И он уже существует, уже проводятся соревнования между подобными творениями (рис. 3.14).

Оптимистичный прогноз по разработке самостоятельно управляемой машины дала компания Tesla. Мечта миллионов – иметь автомобиль с автопилотом уже через 3 года может стать реальностью. Правда, разработчики – компания Tesla признают, что полностью автопилотным он не будет, но 90% функций в управлении

взять на себя все-таки сможет. «Преодолеть остальные 10% будет очень сложно» – заявляют в руководстве Tesla Motors.

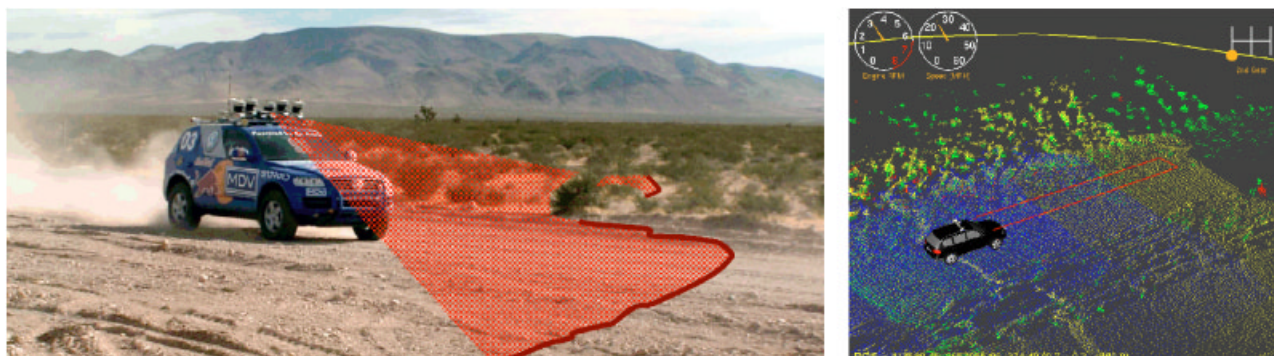


Рис. 3.14. Иллюстрация лазерного сенсора

Остальные компании, занимающиеся разработками в данной области, например Nissan и Daimler, готовы говорить о каком-то прорыве не ранее 2020 года.

### *3.7.2 Мехатронные системы на рельсовом транспорте*

К мехатронным системам на рельсовом транспорте относятся система эффективного управления движением поезда, тормозная система, дверные системы, системы кондиционирования воздуха, системы диагностики поворотных тележек, система распознавания схода с рельсов, системы подачи песка, и стеклоочистительные системы и др.

**Система эффективного управления движением поезда**, например система LEADER® (Locomotive Engineer Assist / Display & Event Recorder) для пассажирских поездов включает в себя установленный на пульте управления машиниста дисплей, который управляется мощным компьютером. С помощью этого дисплея машинист электропоезда получает рекомендации по движению, рассчитанные на основе различных данных. Они, в частности, поступают из предусмотренной базы данных, в которой содержится необходимая информация о маршруте, составе поезда, а также о соответствующем расписании движения. GPS-приемник собирает информацию о текущем положении и скорости поезда.

Данная система оптимизирует профиль движения и тем самым минимизирует образование ненужной кинетической энергии, а также ее преобразование в тепловую энергию при торможении. Таким образом, за счет экономии топлива можно значительно снизить уровень выбросов CO<sub>2</sub>.

Система обеспечивает эффективное управление движением поезда. Максимально строгое соблюдение предусмотренного расписания движения значительно повышает точность движения поездов. Железнодорожное сообщение строго по расписанию повышает удовлетворенность клиентов и не в последнюю очередь – пропускную способность определенных участков.

Уменьшается износ тормозной системы, что значительно сокращает эксплуатационные расходы.

Очень ответственной является **тормозная система** рельсового транспорта. Она включает в себя (рис. 3.15) электронную систему управления, пневматические системы регулирования, систему воздушоснабжения, гидравлические тормозные системы и дополнительные устройства (например, системы подачи песка).

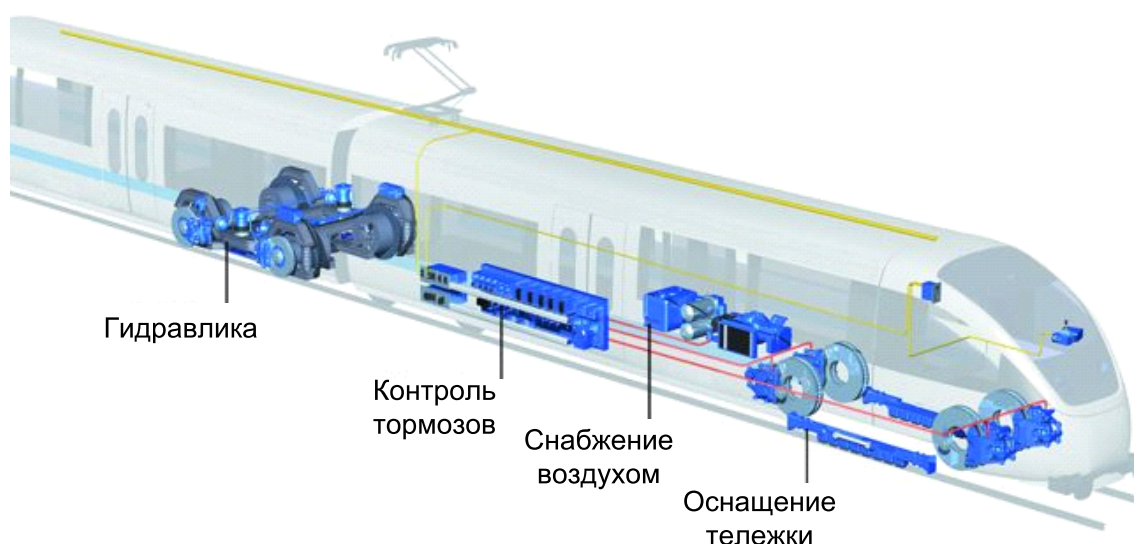


Рис. 3.15. Тормозная система поезда

**Управление тормозом** – это крайне важная часть системы поезда, влияющая на безопасность, так как она должна способствовать надежной остановке поезда в любых условиях эксплуатации.

Оптимальный процесс торможения достигается, когда на всех осях или поворотных тележках всего поезда прикладывается индивидуальная сила торможения. И это все при приведении в действие машинистом локомотива одного единственного тормозного рычага! По этой причине в современных системах управления тормозом встраивается набор дополнительных интеллектуальных функций:

– зависимое от нагрузки торможение загруженных и незагруженных вагонов;



- антиблокировочная тормозная система (предохранение от скольжения);
- контроль внимательности машиниста локомотива (устройство безопасности);
- принудительное торможение с дистанционным управлением (локомотивная сигнализация, PenaltyBrake);
- экстренный тормоз для пассажиров;
- устройство, увеличивающее сцепление колеса с дорогой при проскальзывании колес (защита от буксования).

Не важно, имеется ли на поезде механический тормоз, магниторельсовый тормоз, электродинамический тормоз-замедлитель или торможение генератором за счет поворота привода: система управления тормозом в любом случае заботится об оптимальной согласованности различных систем.

В основе всех решений стоят безопасность и экономичность.

Воздухоснабжение обеспечивается компрессорной системой, охватывающей производство сжатого воздуха с помощью компрессоров, а также подготовку воздуха. Результатом является снабжение системы сжатым воздухом в определенном количестве и нужного качества.

Сжатый воздух – это носитель энергии для элементарных функций поезда. Помимо приведения в действие тормоза, он также применяется для открытия дверей, управления пневматической подвеской, оборудованием подачи песка, а также для подъема пантографов (токоприемников) и для приведения в действие стеклоочистителя.

Существует тенденция к более компактным, более легким транспортным средствам с возрастающим уровнем безопасности и мощности, поэтому спросом пользуются инновационные концепции для надежного нагнетания сжатого воздуха. За счет сокращения интерфейсов можно достичь коротких сроков монтажа или демонтажа. За счет высокой надежности встроенной системы значительно повышается готовность всей системы поезда.

**Система распознавания схода с рельсов** (рис. 3.16) тоже имеет большое значение. Сход с рельсов может стать причиной тяжелых несчастных случаев, а при транспортировке опасного груза – даже катастрофы. Поэтому применяются детекторы схода с рельсов для улучшения безопасности рельсового транспорта. На выбор име-

ется электронная и пневматическая система – обе подходят для большого количества типов транспортных средств.

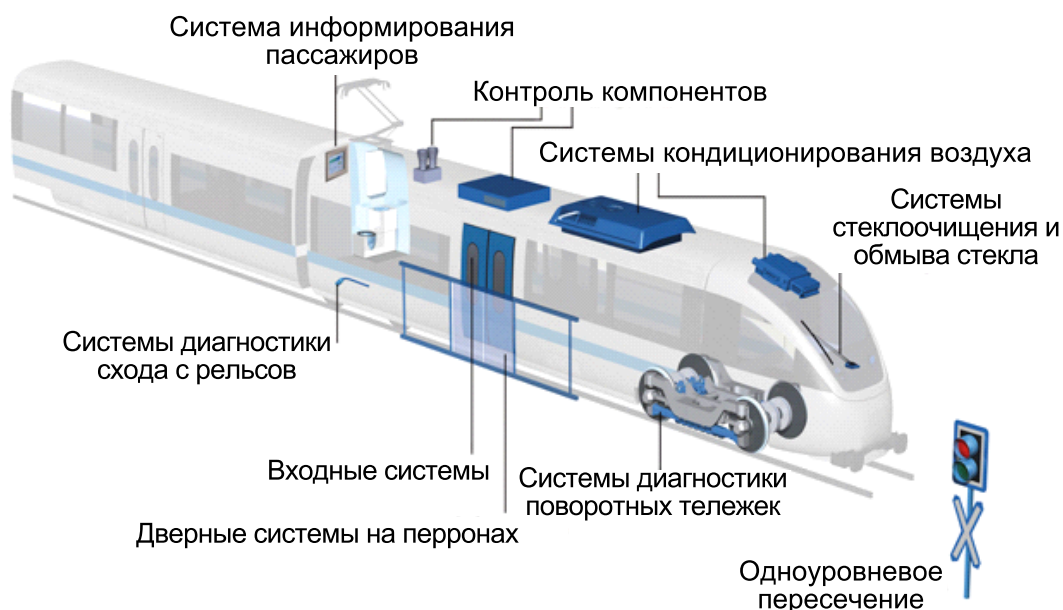


Рис. 3.16. Системы диагностики схода с рельсов, системы диагностики поворотных тележек, системы кондиционирования воздуха, входные системы и дверные системы на перронах, системы стеклоочистения и обмыва стекла, система информирования пассажиров

Детектор схода с рельсов распознает соскользнувшую ось, захватывая и анализируя удары ходовых колес о шпалы. Машинист локомотива получает либо предупредительный сигнал, либо поезд автоматически останавливается. Цель – ограничение косвенных убытков после схода с рельсов.

Применяется:

- в пассажирских вагонах;
- в метро и городской железной дороге;
- в мотор-вагонных поездах;
- при перевозке опасных грузов;
- в грузовых вагонах;
- в вагон-цистернах.

Преимущества:

- повышенная безопасность для людей и материалов;
- ограничение косвенных убытков после схода с рельсов;
- подача сообщения диагностики или непосредственное торможение поезда при сходе с оси рельсов;



- простое дооборудование на существующем вагоне;
- низкие производственные затраты.

**Входные дверные системы.** Посадка и высадка пассажиров может привести к задержке. Поэтому качество и надежность входных систем имеет решающее влияние на экономичность рельсового транспорта. Расчеты показывают, что экономическая польза от высококачественной системы управления дверями превышает расходы на ее приобретение почти в десять раз. Поэтому при разработке систем определения и помощи при посадке главное внимание уделяется безопасности и комфорту пассажиров. Дверные системы находят свое применение как в метро и в трамваях, так и в пассажирских вагонах пригородных поездов, поездов дальнего следования и скоростных поездов. В дверные системы входят:

- внешние двери, раздвижные и откидные двери (рис. 3.17);
- внутренние двери, переходные двери, противопожарные двери;
- двери кабины машиниста, крышки загрузочных люков;
- рампы, откидные и раздвижные подножки (рис. 3.18);
- системы управления дверями, микропроцессорные устройства управления (рис. 3.19);
- системы защиты от заклинивания и системы обнаружения заземления для предотвращения нанесения пассажирам травм дверями.



Рис. 3.17. Внешние двери вагона



Рис. 3.18. Рампы, откидные и раздвижные подножки



Рис. 3.19. Системы управления дверями, микропроцессорные устройства управления

**Дверные системы на перронах.** Раздвижные дверные системы на перронах (рис. 3.20) оказывают решающий вклад в безопасность, климатизацию и чистоту на перроне. Они распространяются на всю длину перрона. Поезд останавливается на позиции, в которой двери транспортного средства и двери перрона совпадают. Каждая дверь перрона состоит из автоматической раздвижной двери с двумя створками. Эти двери встроены в стеклянный элемент стены. Закрытый корпус блока управления дверью препятствует неправомерному доступу. Пороги перрона дают дверям и элементам стены дополнительную опору.

Дверные системы перронов, либо в полную высоту, либо в половину высоты, образуют защиту между пассажирами и поездом, а также рельсами. За счет этого значительно повышается безопасность пассажиров.



Рис. 3.20. Дверная система перрона

Использование дверей во всю высоту защищает пассажиров также от грязи, турбулентности воздуха и шума, возникающих из-за подъезда и отъезда поездов. Дверные системы перронов позволяют создать кондиционирование перрона. Каждая дверная система перрона открывается и закрывается синхронно с дверями поезда. Благодаря применению дверных систем перронов эксплуатирующее предприятие извлекает выгоду из улучшенного соблюдения графика движения и оптимизированной эффективности эксплуатации.

### 3.7.3 Мехатронные системы в легких транспортных средствах

Помимо обычных автомобилей большое внимание уделяется созданию легких транспортных средств (ЛТС) с электроприводом (иногда их называют нетрадиционными). К этой группе транспортных средств относятся электровелосипеды, электророллеры, инвалидные коляски, сегвеи, электромобили с автономными источниками питания (рис. 3.21).



а



б



в

Рис. 3.21. Легкие транспортные средства

ЛТС являются альтернативой транспорту с двигателями внутреннего сгорания и используются в настоящее время в экологически чистых зонах (лечебно-оздоровительных, туристических, выставочных, парковых комплексах), а также в торговых и складских помещениях.

Основой для создания ЛТС являются мехатронные модули типа «мотор-колесо» на базе, как правило, высокомоментных электродвигателей. В табл. 3.1 приведены технические характеристики мехатронных модулей движения для легких транспортных средств. Мировой рынок ЛТС имеет тенденцию к расширению.

*Таблица 3.1*

Технические характеристики мехатронных модулей движения для ЛТС

ЛТС с электроприводом	Технические показатели					
	максимальная скорость, км/ч	рабочее напряжение, В	мощность, кВт	номинальный момент, Нм	номинальный ток, А	масса, кг
Кресла-коляски	6	24	0,15	25	8	10
Электро-велосипеды	15	24	0,3	20	15	12
Роллеры	30	24	0,5	15	20	12
Мини-электромобили	80	110	2,5	30	28	25

Сейчас уже есть возможность выбора таких устройств. Например, компания BionX предлагает 5 моделей **электровелосипедов** (рис. 3.21 а) (табл. 3.2), способных удовлетворить потребности многих велосипедистов.

Наиболее распространенным и понятным критерием выбора является уровень поддержки или уровень ассистирования при pedalировании. Ассистентом выступает мехатронная система. Во всех системах BionX возможно использование 4-х уровней ассистирования. Максимальный уровень ассистента прибавит к усилиям велосипедиста 300% мощности!

Чем больше уровень поддержки – тем больше энергии потребляет система. При выборе модели и при поездках необходимо определиться с тем, что важнее: дальность поездки или максимальный уровень поддержки (ассистирования).

Таблица 3.2

Характеристики моделей электропривода велосипедов,  
предлагаемых компанией BionX

Модель (число в марке – мощность двигателя)	Уровень поддержки	Дистанция
PL 250HT SL XL	35, 75, 150, 300%	105 км
PL 250HT L	35, 75, 150, 300%	90 км
PL 250HT RR M	35, 75, 150, 300%	60 км
PL 250HT RR L	35, 75, 150, 300%	90 км
PL-500 HS	25, 50, 100, 200%	65 км
PL 250HT L	25, 50, 100, 200%	35 км
PL 350HT L	25, 50, 100, 200%	65 км

На смену мотороллерам приходят **электророллеры** (рис. 3.21 б). И это не просто обычный мотороллер, а быстрое, модное и экологичное средство передвижения по городу. Находят распространение и сегвеи (Segway) (рис. 3.21 в).

В борьбе за выживание в переполненных мегаполисах с их постоянными транспортными коллапсами электророллеры могут подарить своим владельцам мобильность. В разработку такого средства передвижения включилась калифорнийская компания Lit C-1. Ее двухколесный роллер умеет самостоятельно удерживать равновесие.

Если верить экспертам, то очень скоро всех жителей планеты ждет транспортный коллапс. Решить проблему могут электрические роллеры. Они требуют меньше места на улице и потребляют относительно мало электричества. Единственный недостаток: в плохую погоду пассажир не защищен от дождя, а движение на двух колесах похоже на игру с удачей в прятки.

Для всех скептиков двухколесных транспортных средств разработчики приготовили достойный ответ: модель C-1 калифорнийского производителя Lit Motors. Речь идет об электророллере с кабиной, в которой могут разместиться до двух человек (рис. 3.22).

Максимальная скорость будущего электророллера будет свыше 160 км/час, но еще больше впечатляет его дальность поездки: энергии 8-киловаттного аккумулятора хватит на 320 километров после одной зарядки.

C-1 не является спартанским: на его борту есть кондиционер, ремни и подушки безопасности, полностью функциональные стекла и мультимедийная система с подключением смартфона и постоянным доступом к «облаку» данных.



Рис. 3.22. Электророллер с кабиной

Изюминкой С-1 являются два гироскопа, которые удерживают электророллер в вертикальном положении. С-1 не страшны светофоры, перед которыми нужно останавливаться. По данным производителя два гироскопа внутри раскручиваются до 12 000 оборотов в минуту и обеспечивают устойчивость электророллера даже во время полной остановки.

Этот механизм работает по принципу юлы и разработчики настолько уверены в нем, что гарантируют устойчивость даже во время аварии, а во время торможения гироскопы обеспечивают компенсацию масс.

По заявлениям производителя в настоящее время речь идет о прототипе, но в 2014 году ситуация кардинально изменится – С-1 выйдет небольшой серией по цене 24 000 долларов. Если дело дойдет до массового производства, то цена понизится до 16 000 долларов.

#### *3.7.4 Мехатронные системы на водном транспорте*

Мехатронные системы на морском транспорте находят все более широкое применение для интенсификации труда экипажей морских и речных судов, связанных с автоматизацией и механизацией основных технических средств, к которым относятся главная энергетическая установка с обслуживающими системами и вспомогательными механизмами, электроэнергетическая система, общесудовые системы, рулевые устройства и двигатели.

Комплексные автоматические системы удержания судна на заданной траектории (СУЗТ) или судна, предназначенного для иссле-

дования Мирового океана, на заданной линии профиля (СУЗП) относятся к системам, обеспечивающим третий уровень автоматизации управления. Применение таких систем позволяет:

- повысить экономическую эффективность морских транспортных перевозок за счет реализации наилучшей траектории, движения судна с учетом навигационных и гидрометеорологических условий плавания;

- повысить экономическую эффективность океанографических, гидрографических и морских геологоразведочных работ за счет увеличения точности удержания судна на заданной линии профиля, расширения диапазона ветроволновых возмущений, при которых обеспечивается требуемое качество управления, и увеличения рабочей скорости судна;

- решать задачи реализации оптимальной траектории движения судна при расхождении с опасными объектами;

- повысить безопасность мореплавания вблизи навигационных опасностей за счет более точного управления движением судна.

Комплексные автоматические системы управления движением по заданной программе геофизических исследований (АСУД) предназначены для автоматического выведения судна на заданную линию профиля, автоматического удержания геолого-геофизического судна на исследуемой линии профиля, маневрирования при переходах с одной линии профиля на другую. Рассматриваемая система позволяет повысить эффективность и качество морских геофизических исследований.

В морских условиях невозможно применение обычных методов предварительной разведки (поисковая партия или детальная аэрофотосъемка), поэтому наиболее широкое распространение получил сейсмический метод геофизических исследований (рис. 3.23). Геофизическое судно 1 буксирует на кабель-тросе 2 пневматическую пушку 3, являющуюся источником сейсмических колебаний, сейсмографную косу 4, на которой размещены приемники отраженных сейсмических колебаний, и концевой буй 5. Профили дна определяют посредством регистрации интенсивности сейсмических колебаний, отраженных от пограничных слоев 6 различных пород.

Для получения достоверной геофизической информации судно должно удерживаться на заданном положении относительно дна (линии профиля) с высокой точностью, несмотря на малую скорость

движения (3-5 узлов) и наличие буксируемых устройств значительной длины (до 3 км) с ограниченной механической прочностью.

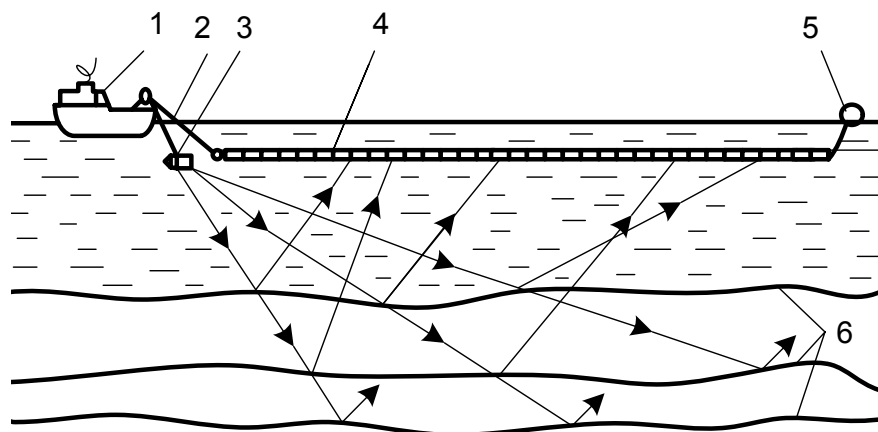


Рис. 3.23. Схема проведения геофизических исследований

С помощью мехатронной системы можно автоматически вывести судно на запрограммированную траекторию и удерживать на ней.

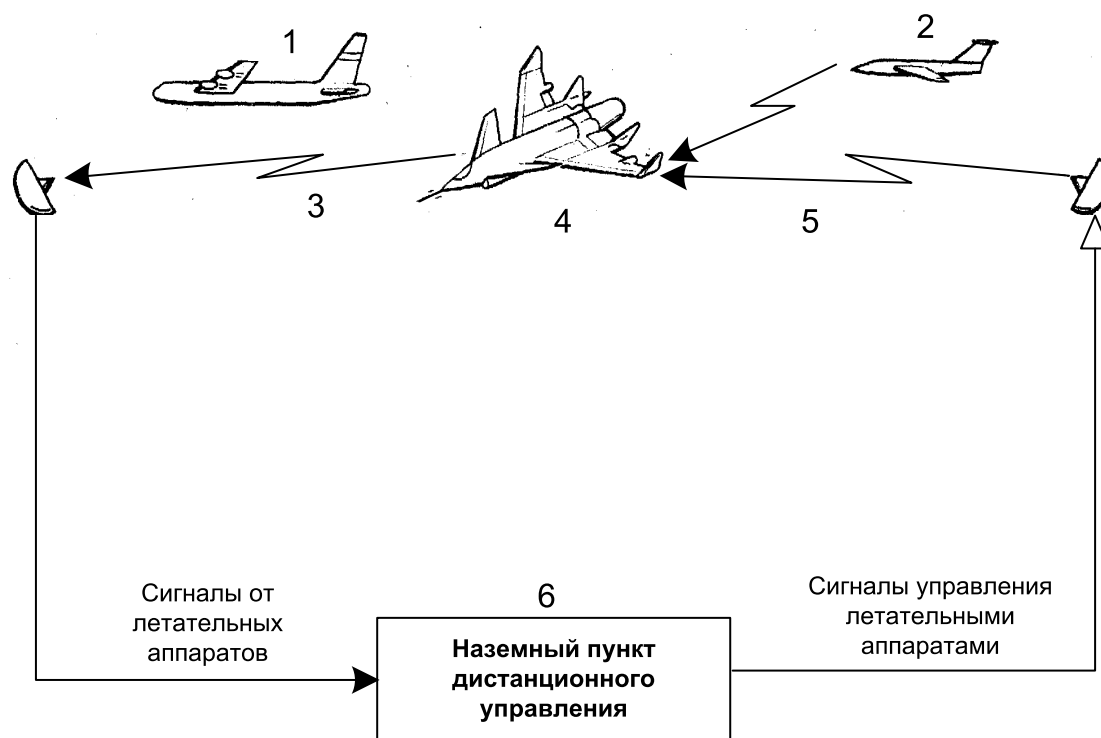
### 3.7.5 Мехатронные системы в авиации

Современные самолеты и космическая техника имеют в своем составе огромное количество мехатронных систем и модулей. Мы не будем рассматривать внутреннее строение авиационной техники. Обратим внимание на то, что успехи, достигнутые в развитии авиационной и космической техники с одной стороны и необходимость снижения стоимости целевых операций с другой, стимулировали разработки нового вида техники – дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА).

На рис. 3.24 представлена структурная схема системы дистанционного управления полетом ДПЛА – НІМАТ. Основной компонентой системы дистанционного пилотирования НІМАТ является наземный пункт дистанционного управления. Параметры полета ДПЛА поступают в наземный пункт по линии радиосвязи от летательного аппарата, принимаются и декодируются станцией обработки телеметрии и передаются в наземную часть вычислительной системы, а также на приборы индикации информации в наземном пункте управления. Кроме этого, с борта ДПЛА поступает отображаемая с помощью телевизионной камеры картина внешнего обзора. Телевизионное изображение, высвечиваемое на экране наземного рабочего



места человека-оператора, используется для управления летательным аппаратом при воздушных маневрах, заходе на посадку и при самой посадке. Кабина наземного пункта дистанционного управления (рабочее место оператора) оборудована приборами, обеспечивающими индикацию информации о полете и состоянии аппаратуры комплекса ДПЛА, а также средствами для управления летательным аппаратом. В частности, в распоряжении человека-оператора имеются ручки и педали управления летательным аппаратом по крену и тангажу, а также ручка управления двигателем. При выходе из строя основной системы управления подача команд системы управления происходит посредством специального пульта дискретных команд оператора ДПЛА.



1 – носитель В-52; 2 – резервная система управления на самолете TF-104G; 3 – линия телеметрической связи с землей; 4 – ДПЛА НІМАТ; 5 – линии телеметрической связи с ДПЛА; 6 – наземный пункт дистанционного пилотирования

Рис. 3.24. Система дистанционного пилотирования ДПЛА НІМАТ

В качестве автономной навигационной системы, обеспечивающей счисление пути, используются доплеровские измерители путевой скорости и угла сноса (ДПСС). Такая навигационная система

используется совместно с курсовой системой, измеряющей курс датчиком вертикали, формирующим сигналы крена и тангажа, и бортовой ЭВМ, реализующей алгоритм счисления пути. В совокупности эти устройства образуют доплеровскую навигационную систему. Что бы повысить надежность и точность измерения текущих координат летательного аппарата, ДПСС может объединяться с измерителями скорости.

### *3.7.6 Мехатронные системы транспортировки и складирования на производстве*

Может возникнуть вопрос: зачем в ликероводочном производстве и виноделии нужны мехатронные системы транспортировки, паллетирования и складирования? Ответ прост – для того, чтобы быть конкурентоспособными.

Следующий вопрос – почему именно мехатронные системы? Потому что только они позволяют автоматизировать транспортные потоки, сократить издержки, снизить себестоимость продукции, уменьшить брак и возврат продукции.

Фактически на предприятиях только 5 % времени затрачивается на производство продукции, а остальные 95 % – на логистические операции. Как правило, в процессе производства около 70 % стоимости конечного продукта составляют расходы на упаковку, хранение и транспортировку продукта.

Преимущества мехатронных систем: относительно низкая стоимость, высокое качество продукции; высокая надежность и долговечность, компактность, хорошие массогабаритные и динамические характеристики, гибкость.

В последние годы мехатронные системы стали все чаще применяться в пищевой промышленности. Это вызвано экономическими причинами: снижением их стоимости, увеличением стоимости рабочей силы, повышением качества готовой продукции за счет устранения влияния человеческого фактора, повышением производительности труда, гибкостью при переходе с одного вида продукции на другой и др.

На российских предприятиях все еще велика доля ручного труда, особенно на таких монотонных операциях как паллетирование и складирование. Для сравнения, численность персонала, занятого этими операциями, на западных предприятиях в 5-10 раз ниже, чем на российских.

Мехатронная система транспортировки, паллетирования и складирования состоит из двух подсистем: подсистемы транспортировки и паллетирования и подсистемы складирования. Для эффективной работы всей системы эти подсистемы должны быть взаимосвязаны.

Типовая мехатронная система транспортировки и паллетирования включает в себя следующие основные компоненты:

- конвейерная система подачи пустых паллет;
- конвейерная система подачи продукции (коробки, бутылки);
- система формирования продукции для укладки на паллету;
- система укладки продукции на паллету;
- робот(ы);
- конвейерная система отвода полных паллет;
- система автоматизации;
- система безопасности;
- обмотчик в стреч-пленку;
- дополнительное оборудование (магазин паллет, магазин прокладок, системы штрих-кодирования, видеонаблюдения и пр.).

Иногда такую систему называют роботизированной системой транспортировки и паллетирования – РСТП. Ключевым элементом РСТП является робот.

Информационная система является ключевым звеном и состоит из электронных компонентов и программного обеспечения, осуществляет хранение, обработку и управление данными о движении готовой продукции. Она также отвечает за интеграцию с электронными компонентами конвейера готовой продукции, передачу данных в подсистему отчетности, управление настройками системы. Вся информация о движении готовой продукции сохраняется в базе данных.

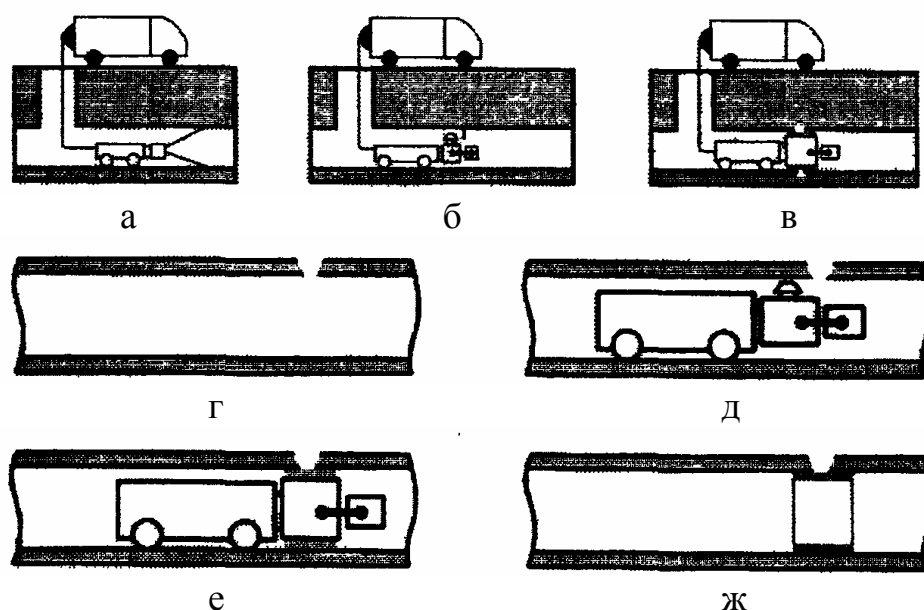
Опыт внедрения и эксплуатации мехатронных систем транспортировки, паллетирования и складирования показывает, что они являются действенным механизмом повышения эффективности производства. Несмотря на кажущиеся, на первый взгляд, высокие капитальные затраты, опыт внедрения роботизированных систем у российских и зарубежных заказчиков показывает, что системы окупаются за 6-36 месяцев. Безусловно, что внедрение РСТП наиболее выгодно для высокопроизводительных линий.

### **3.8 Транспортные работы специального назначения**

#### **Мобильные роботы для ремонта подземных трубопроводов.**

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефтяных и газопроводов, для водопроводных и канализационных сетей (особенно для крупных городов и мегаполисов), для каналов водосброса и водозабора из рек. Применение мобильных роботов для телеинспекции и обслуживания магистралей позволяет предупреждать техногенные и экологические аварии и катастрофы 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.

В качестве примера решения этой технической проблемы рассмотрим робот Р-200, предназначенный 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. 3.25 а. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиком пути, датчиком углов крена и дифферента 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.



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

Рис. 3.25. Схемы роботизированных операций

Телероботы 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 швах, 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. 3.25 б-ж.

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

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, которая, в частности, заключается в автоматическом принятии решений о

поведении роботов, это позволит повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения.

Автоматическое принятие решений рассматриваемым роботом, без непосредственного участия человека-оператора, целесообразно на следующих операциях:

- обнаружение и распознавание постороннего объекта в трубопроводе с использованием информации системы технического зрения и локационных датчиков;

- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сенсорных сигналов от двухкомпонентного датчика крена-дифферента 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.

**Мобильные роботы военного назначения.** Робот BigDog – четырехногий робот с адаптивным управлением, созданный в 2005 году фирмой Boston Dynamics (рис. 3.26). Проект BigDog финансируется Defense Advanced Research Projects Agency с надеждой на то, что робот сможет переносить снаряжение и помогать солдатам на территории, где не способен передвигаться обычный транспорт. Вместо колес и гусениц BigDog использует четыре ноги. В ногах находится большое количество разнообразных сенсоров. Также у BigDog имеется лазерный гироскоп и система бинокулярного зрения.



Рис. 3.26. Робот Big Dog на пересеченной местности

Длина робота Big Dog – 0,91 м, высота 0,76 м, вес 110 кг. Его устройство представлено на рис. 3.27. В настоящее время он способен передвигаться по труднопроходимой местности со скоростью 6,4 км в час, перевозить 154 кг груза и подниматься на 35 градусную наклонную плоскость. Его передвижение контролирует компьютерная система, которая получает данные от различных сенсоров.

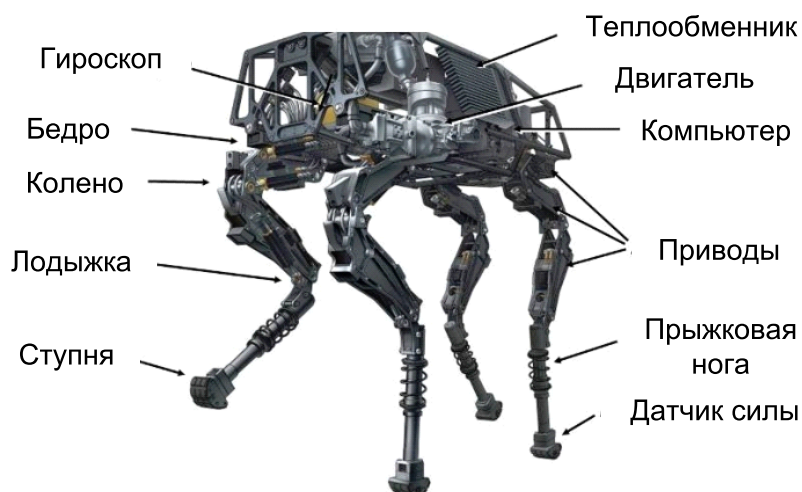


Рис. 3.27. Устройство робота Big Dog

Big Dog приводится в движение двухтактным одноцилиндровым двигателем от карта со скоростью вращения 9000 об/мин, из-за чего слышен громкий звук мотора. В последующих версиях робота планируется исправить этот демаскирующий недостаток. Мотор служит приводом для гидронасоса, который в свою очередь питает гидродвигатели ног. В каждой из ног установлено по 4 гидродвигателя (два для бедренного сустава, и по одному для коленного и голеностопного суставов) общим числом 16. Каждый из гидродвигателей состоит из гидроцилиндра, сервоклапана, а также датчиков положения и усилия. Робот обладает хорошей устойчивостью: во время испытаний он не падал при проходе по льду и при сильных толчках.

Недавно стало известно, что транспортный робот BigDog стал тише, быстрее и умнее. Поскольку робот стал переносить багаж, то стал больше походить не на собаку, а на ишака, то его еще зовут «робомул».

Компания Boston Dynamics, работающая на Американское агентство перспективных исследовательских оборонных проектов

(DARPA, подразделение Пентагона), усовершенствовала своего «робомула». Теперь он способен передвигаться быстрее и бесшумнее.

В робота встроили устройства слежения, благодаря чему он научился автоматически следовать за командиром взвода и с помощью глаз-датчиков различать деревья, камни, препятствия на местности и людей. Таким образом, аппарат больше не требует управления. Новая версия «робомула» работает намного тише предшественника и способна преодолевать препятствия, которые были непреодолимыми для предыдущей модификации. «Ишак» продемонстрировал умение «вставать и ложиться». Робот может передвигаться по бездорожью, перенося при этом свыше 180 килограмм груза. Правда, без подзарядки он способен пройти не более 32 километров.

Ключевые характеристики робота еще предстоит доработать. Среди них – «способность в течение суток без дозаправки переносить груз до 180 килограммов на расстояние до 33 километров». Систему «зрения» предполагается довести до такого состояния, чтобы она позволяла «следить за конкретным человеком или объектом, замечать препятствия по ходу движения и автоматически корректировать курс по мере необходимости». Роботу нужно будет добавить еще и «слух», чтобы он мог выполнять команды типа «стоять», «сидеть» или «ко мне». Для солдат «ишак» должен также служить дополнительным источником питания, позволяющим, например, перезаряжать батарейки раций и других устройств.

Предполагается, что робот будет использоваться, прежде всего, в военных целях. Он сможет переносить военное снаряжение и оборудование. Это позволит повысить мобильность военных отрядов.

Позже на основе Big Dog был создан Cheetah (гепард) – робот, который до сих пор считается самым быстрым в мире. Средняя скорость этого устройства – 29 км/час, а на специально сконструированной дорожке «Гепард» способен разогнаться до 80 км/ч. (рис. 3.28).

Пока «Гепард» – лишь исследовательская платформа, сообщает Boston.com. Однако, если Cheetah дорастет до боевого прототипа, он сможет выполнять разнообразные задачи на поле боя, в том числе преследовать врага и помогать раненым. Для этого конструкторы должны научить его передвигаться с высокой скоростью, уметь петлять, резко останавливаться и стремительно разгоняться. Такого робота можно будет использовать и в гражданских целях, к примеру, для спасения пострадавших от несчастных случаев.



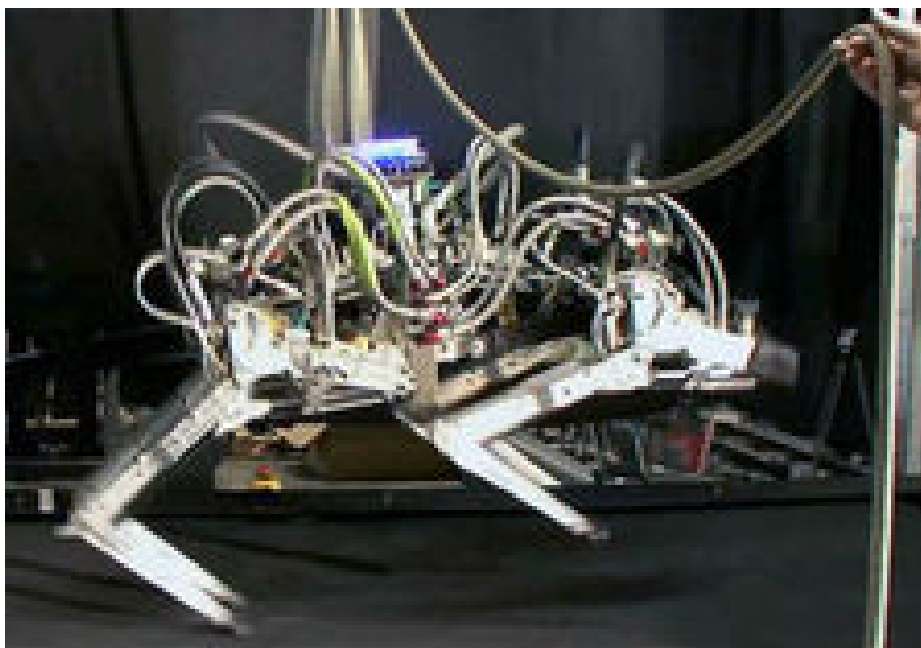


Рис. 3.28. Робот «Гепард»

Компания Boston Dynamics начинает разработку **«боевого варианта»** четвероногого робота BigDog (рис. 3.29).



Рисунок 3.29 – Боевой вариант робота

Управление перспективных исследовательских программ Пентагона DARPA поставило перед компанией Boston Dynamics новую задачу, в рамках которой должен быть разработан новый вариант четвероногого робота BigDog, который должен получить защиту от поражения стрелковым оружием, новую бесшумную энергетическую и двигательную систему, которая позволит ему скрытно передвигаться в местах проведения боевых действий.

Совершенно не удивительно, что бесшумная система электропитания находится в первых строчках списка требований. Ведь существующие роботы LS3 имеют гидравлическую систему, которая приводится в действие двигателем внутреннего сгорания, который сильно шумит. Однако, создание системы электропитания, способной удовлетворить все потребности механизмов робота LS3 в течение длительного времени, является на сегодняшний день трудно-выполнимой задачей. Единственным вариантом, который может решить проблему снабжения энергией и удовлетворить обе стороны, является использование гибридной схемы, допускающей периодическое переключение робота LS3 в бесшумный электрический стелс-режим по мере необходимости.

Надежность и живучесть робота – это также важные параметры, которые повлияют на его использование в боевых условиях. На имеющихся в сети снимках робота LS3 хорошо видно насколько сложно это устройство и сколько в нем использовано маленьких, хрупких и точных узлов и механизмов. Благодаря примитивной защите и интеллектуальной системе управления робот LS3 хорошо защищен от столкновений и от падений. Но любая вражеская пуля, пусть и даже самого маленького калибра, превратит эту грудку механики, гидравлики и электроники просто в грудку высокотехнологичного хлама. Здесь специалистам компании Boston Dynamics также придется искать компромиссное решение, которое не обременит робота большим лишним весом.

Хорошо известный робот BigDog «вырастил» в своей передней части (вместо головы) мощную и сильную **руку-манипулятор**, с помощью которой он научился швыряться тяжеленными шлакоблоками (рис. 3.30). Специалисты компании Boston Dynamics считают, что эта новая конечность позволит роботу приобрести массу новых возможностей и расширить ряд выполняемых им действий: «Робота BigDog по роду службы приходится обращаться с тяжелыми предметами. Цель наших дальнейших исследований и модификаций робота заключается в том, чтобы робот смог, используя движения, силу своих ног и туловища, оказывать помощь манипулятору, который манипулирует тяжелыми объектами».

Один шлакоблок весит около 23-25 килограмм, таким образом, для того, чтобы бросить его требуется достаточно много силы. Если смотреть видео в замедленном темпе, можно заметить, что в броске

участвует все тело робота BigDog, а не только один его манипулятор. Для реализации такого взаимодействия различных частей конструкции роботов специалисты компании Boston Dynamics изучали различные движения людей и животных, которые, выполняя различные действия, полагаются на интегрированное движение всего тела.



Рис. 3.30. Робот BigDog с рукой-манипулятором

Помимо разбрасывания тяжелых шлакоблоков, наличие руки-манипулятора у робота BigDog позволит ему опираться на эту руку при преодолении препятствий, во время передвижения по сложной местности, вытягивать самого себя из ловушки и многое другое, что смогут придумать позже специалисты компании Boston Dynamics.

**Роботы для войны на море.** В Израиле заказчикам поставляется безэкипажный патрульный **катер «Протектор»** (рис. 3.31). Его назначение, как следует даже из названия («Защитник»), — обеспечение безопасности портов, военно-морских баз, гидротехнических и плавучих нефтедобывающих сооружений, других объектов «водной» инфраструктуры.

Эффективно решать возложенные на него обязанности «Протектору» позволяют мощное радиоэлектронное вооружение (радар и интегрированный многосенсорный оптико-электронный комплекс «Топлайт» с видеокамерой дневного и ночного обзора и тепловизором) и современное вооружение – 7,62-мм пулемет «Мини-Тайфун» Mk49, установленный на стабилизированной платформе и оборудованный компьютеризированной системой управления огнем с лазерным дальномером.



Рис. 3.31. Патрульный катер «Протектор»

А вот специалисты массачусетской компании «Лаборатория Дрейтера» решили взять за основу те образцы, которые создала сама природа. Спроектированный ими прототип подводного автономного аппарата внешне напоминает большую рыбу (рис. 3.32) **«Желтохвостый тунец»**, как его прозвали разработчики, обладает меньшей заметностью (длина – около 2,4 метра, масса – 173 килограмма) и намного большей подвижностью, чем другие подводные роботы в данном классе.

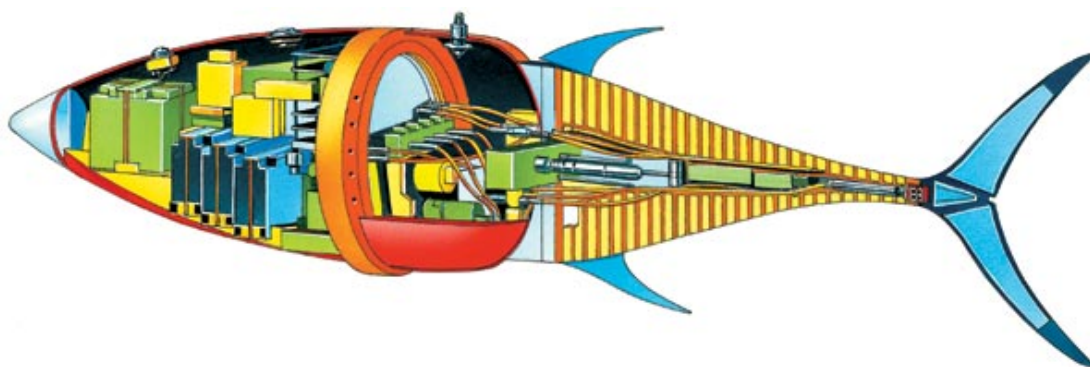


Рис. 3.32. Американский робот-рыба в разрезе

Высокой маневренности инженерам лаборатории удалось достичь, как считается, благодаря тому, что форма корпуса этого робота, принцип его движения и кинематика были практически полностью позаимствованы у тезки – желтохвостого тунца. Забавно наблюдать за тем, как этот «морской житель», почти как живой, шевелит хвостом и рассекает воду плавниками.

Официальное название робота – «необитаемый подводный аппарат, использующий эффект вихревого движения» (VCUUV), что отражает сущность его движительного комплекса, имитирующего движение в воде своего прототипа. Робота-рыбу предполагается использовать как для противоминных операций, так и для патрулирования назначенных акваторий, ведения разведки и наблюдения.

По такому же пути – копированию природных «задумок» – пошли и инженеры Морского научного центра из американского Северо-восточного университета, штат Массачусетс. Они создали двух подводных противоминных роботов, напоминающих по своему внешнему виду и принципу движения обычных лобстеров (омаров). Назвали они свое творение «Биометрический подводный робот» («БУР-1» и «БУР-2»), а неофициально – **робо-лобстер** (рис. 3.33).



Рис. 3.33. Американский робо-лобстер

Механическое ракообразное весит 8,5 фунта (3,86 килограмма) и имеет, как и его природный прототип, лапки – всего их восемь (по четыре на «борт»), а также клешни – два манипулятора, с помощью которых робот проводит обследование мин и миноподобных объектов, обнаруженных более крупными подводными необитаемыми аппаратами. Эти роболобстеры (длина – 61 сантиметр, ширина – 40,6 сантиметра, высота – 12,7-25,4 сантиметра) могут работать даже в полностью автономном режиме, в качестве источников питания используются никель-металлгидридные или литий-ионные батареи (срок работы от 1 до 3 часов), а в качестве мозга применена достаточно сложная бортовая система управления. В основном этот аппарат

предназначен для работы в мелководных районах морей и в речных акваториях глубиной до 50 метров, даже отличающихся относительно сильным течением – со скоростью до 100 см/с. Он прогуливается по морскому дну в поисках подводных мин, которые не только находит, но и уничтожает. Максимальная его собственная скорость – не менее 10 см/с, а радиус действия от командного пункта составляет от 700 до 1400 метров.

**Боевая беспилотная авиация** обусловлена, прежде всего, постоянно возрастающей стоимостью пилотируемых летательных аппаратов и стоимостью обучения экипажа для них – в то время как для значимого количества задач присутствие человека не обязательно. Тенденция к увеличению процента боевых вылетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, БЛА) в будущем будет сохраняться.

Различают беспилотные летательные аппараты:

- беспилотные неуправляемые;
- беспилотные дистанционно-пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА);
- беспилотные автоматические.

Выделяют следующие классы аппаратов:

- «микро» (условное название) – массой до 10 килограммов, временем полета около 1 часа и высотой до 1 километра;
- «мини» – массой до 50 килограммов, временем полета несколько часов и высотой до 3-5 километров;
- средние («миди») – до 1 000 килограммов, временем 10-12 часов и высотой до 9-10 километров;
- тяжелые – с высотами полета до 20 километров и временем полета 24 часа и более.

Для определения координат и земной скорости современные БПЛА, как правило, используют спутниковые навигационные приемники (GPS или ГЛОНАСС). Углы ориентации и перегрузки определяются с использованием гироскопов и акселерометров.

**США** являются одним из **признанных лидеров** в разработке и производстве БПЛА (дронов – от англ. drone – трутень), которые используются для разведки, как ударная сила, а также для решения транспортных и других задач специального назначения. К началу 2012 года БПЛА составили почти треть парка стоявших на вооружении летательных аппаратов (количество беспилотников в составе вооруженных сил, достигло 7 494 единиц, в то время как количество пилотируемых аппаратов – 10 767 единиц).



Первым ударным БПЛА стал разведывательный MQ-1 Predator, оснащенный ракетами AGM-114C Hellfire. В феврале 2002 года, данный аппарат впервые нанес удар по внедорожнику предположительно принадлежавший пособнику Усамы Бен Ладена мулле Мохаммеду Омару. Применение беспилотников вызвало глубокое возмущение в мусульманских странах, против которых они в настоящее время и применяются, а также в рядах правозащитников, которые усматривают здесь нарушение законов ведения войны.

На рис. 3.34 приведены фотографии некоторых из многочисленного отряда дронов.



Рис. 3.34. Фотографии некоторых типов дронов

Летательный разведывательный аппарат весом не более 13 грамм, который может находиться в воздухе порядка 20 минут, представила **израильская компания Israel Aerospace Industries (IAI)**. Разработчики позаимствовали механизм движения у **стрекозы** (рис. 3.35), однако окончательным примером для дальнейших версий беспилотника станет бабочка.



Рис. 3.35. Израильская «стрекоза»

Сейчас у аппарата четыре крыла, он способен абсолютно бесшумно находиться в нескольких метрах над головой человека и даже, благодаря прозрачным крыльям, сливаться с окружающими предметами. Маленький вариант аппарата и вовсе весит около 8 грамм, а питается он от двух батареек массой по 2 грамма каждая.

Аппарат оснащен видеокамерой весом 1 грамм. Они парят в воздухе с помощью электродвигателя, который совершает 7 тыс. оборотов в минуту. Лозунгом создателей беспилотника стала фраза: «Если природа может это сделать, мы попытаемся этому подражать».

Кроме названных аппаратов, ведутся работы по созданию принципиально новой конструкции планера-беспилотника, рассчитанного на повышенные нагрузки в сравнении с пилотируемой авиацией, а также по оснащению БПЛА более совершенной системой управления для упрощения работы наземного оператора.

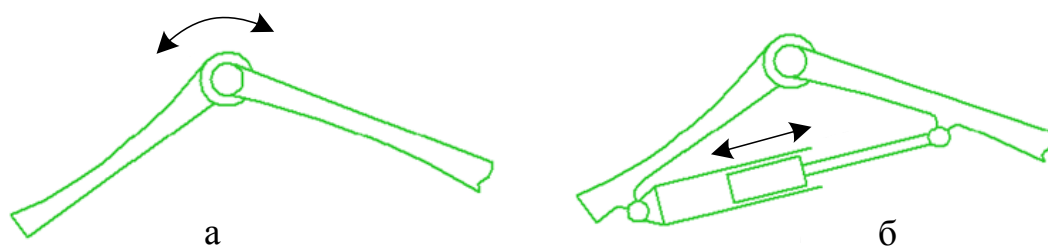
### **3.9 Технологические машины-гексаподы**

#### *3.9.1 Введение в параллельные механизмы*

Большинство механических рук промышленных роботов и других манипуляторов более или менее напоминают человеческую руку и содержат последовательно расположенные двигатели, каждый из которых встроен в шарнир или связан с шарниром, имеющим одну степень свободы. На рис. 3.36 а показан двигатель вращения, распо-



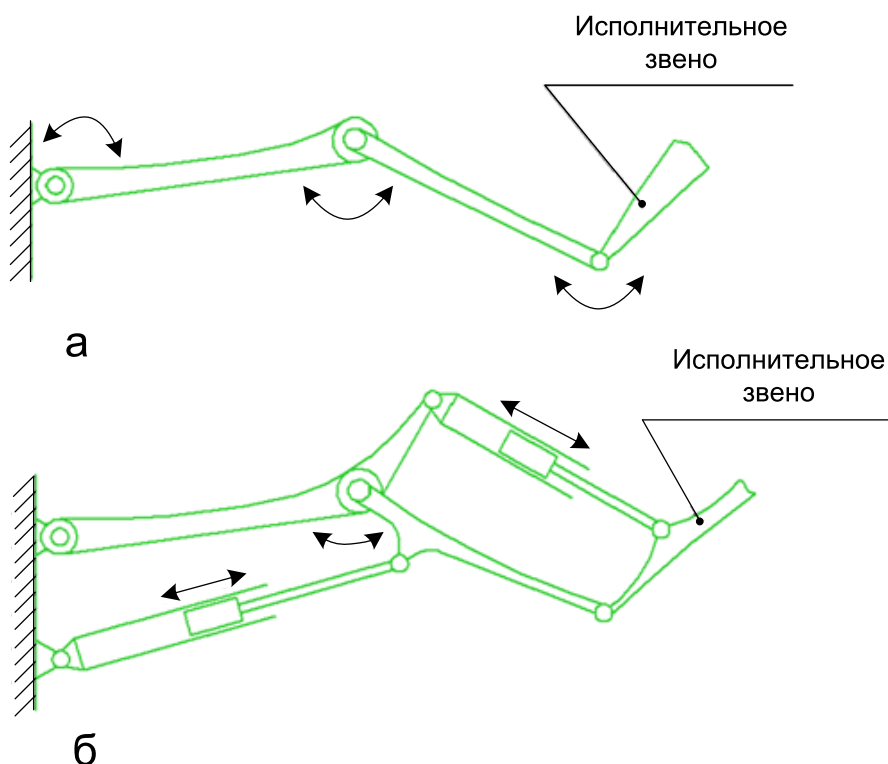
ложенный в шарнире; на рис. 3.36 б линейный двигатель, «охватывающий» шарнир.



а — с помощью вращательного двигателя в шарнире;  
б — с помощью линейного двигателя, «охватывающего» шарнир

Рис. 3.36. Схема управления вращением шарнира

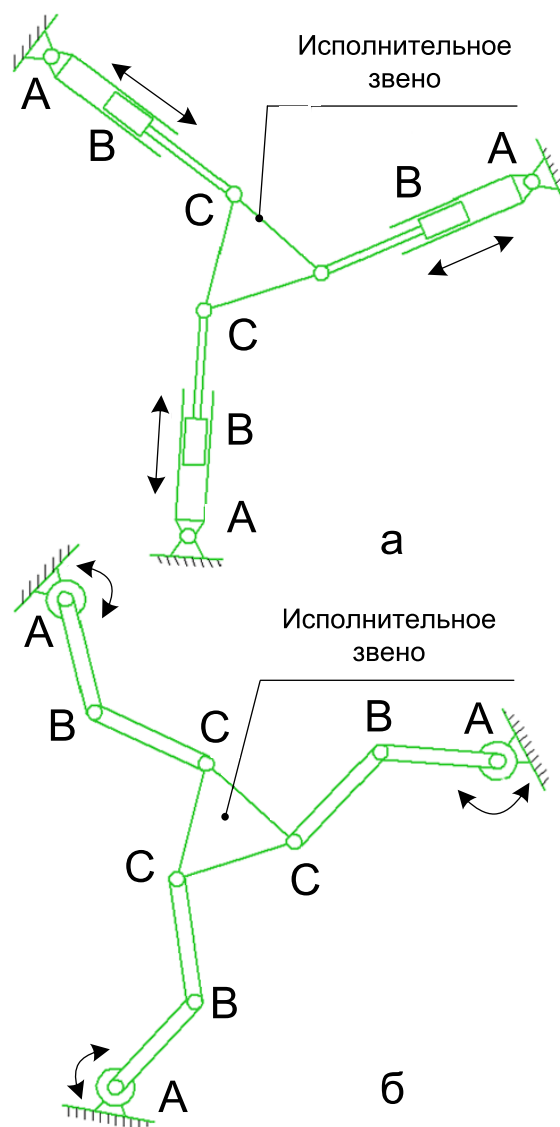
С геометрической точки зрения оба этих случая выполняют одну и ту же функцию. Расположение двигателя на рис. 3.36 б более «биоморфно», поскольку вытягивание линейного двигателя точно соответствует сокращению мышцы, расположенной между соседними костями сустава. Рис. 3.37 иллюстрирует аналогичный способ расположения двигателей, охватывающих два шарнира, при этом двигатели действуют частично параллельно друг другу и не соединены просто последовательно.



а — три последовательно расположенные вращательные двигатели;  
б — два линейных двигателя охватывающие по два шарнира.

Рис. 3.37. Два плоских манипулятора с тремя степенями свободы

Еще одним из подобных примеров является способ управления плоским движением исполнительного звена или стола. Два варианта, показанные на рис. 3.38, геометрически эквивалентны; все три ведущие цепи действуют полностью параллельно. Такая схема представляет собой полную противоположность схеме обычного «последовательного» привода, например, крестового стола фрезерного станка.



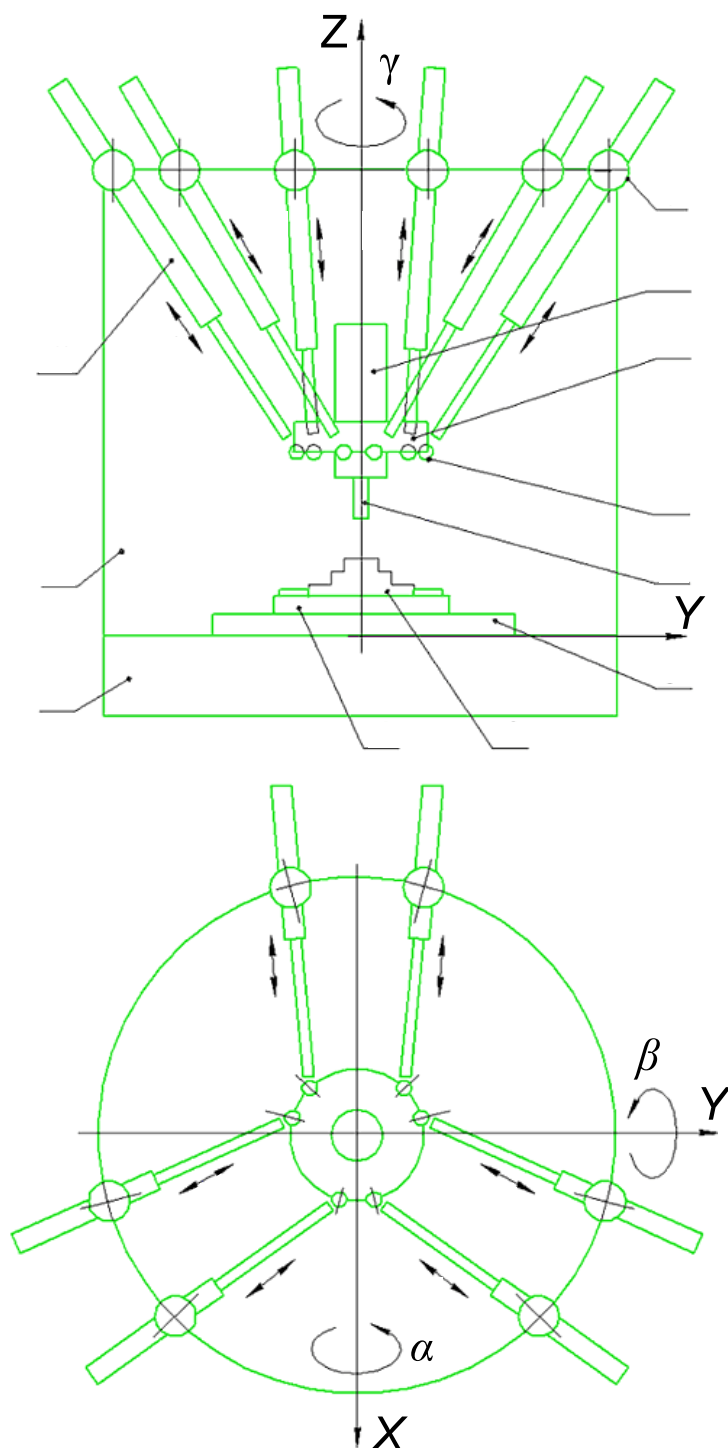
а – манипулятор с параллельно действующими линейными двигателями; б – манипулятор с параллельно действующими вращательными двигателями

Рис. 3.38. Два трехступенных плоских манипулятора

### Гексапод.

Одним из примеров параллельного механизма с 6-ю степенями свободы является гексапод. Впервые кинематика гексапода был

описана в работе Гауфа в 1956 г. На рис. 3.39 показана схема механизма, на рис. 3.40 практическая реализация схемы – многоцелевой фрезерный станок OKUMA PM-600.



1 – верхний шарнир, связанный с основанием; 2 – заготовка; 3 – инструмент; 4 – основание; 5 – платформа; 6 – приспособление; 7 – станина; 8 – стол; 9 – шарнир, связанный с платформой; 10 – шпиндельный узел; 11 – штанга

Рис. 3.39. Принципиальная схема станка-гексапода

Типичный гексапод выполнен на базе шести механизмов поступательного перемещения, представляющих собой, например, шариковые винтовые передачи ШВП. Для изменения их длины служат регулируемые электроприводы. Контроль за величиной перемещения осуществляется датчиками положения. Одним концом штанга шарнирно соединена с основанием, а другим (также шарнирно) – с подвижной платформой, на которой установлен рабочий орган, например, мотор-шпиндель. Управляя вылетом штанг по программе, можно управлять положением шпинделя по шести координатам:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и тремя углами поворота.



Рис. 3.40. Японский обрабатывающий центр OKUMA PM-600

### **Ротопод.**

Другим примером шестиосевого механизма является ротопод (рис. 3.41). В данной схеме ведущие двигатели расположены в поворотных шарнирах основания, а штанги имеют постоянную длину. Этим обеспечивается относительно меньшая масса самого устройства и большая скорость перемещения исполнительного узла, чем у механизма по схеме гексапод.

### **Дельта-механизм.**

Третьим примером 6-ти осевого параллельного механизма является дельта-механизм (рис. 3.42). Здесь ведущие вращательные двигатели расположены на основании, а каждая штанга разделена на две части. Первая полуштанга одним концом соединена с двигателем, другим концом – с карданным шарниром, связывающий ее со

второй полуштангой. Вторая полуштанга через сферический шарнир связана с платформой.

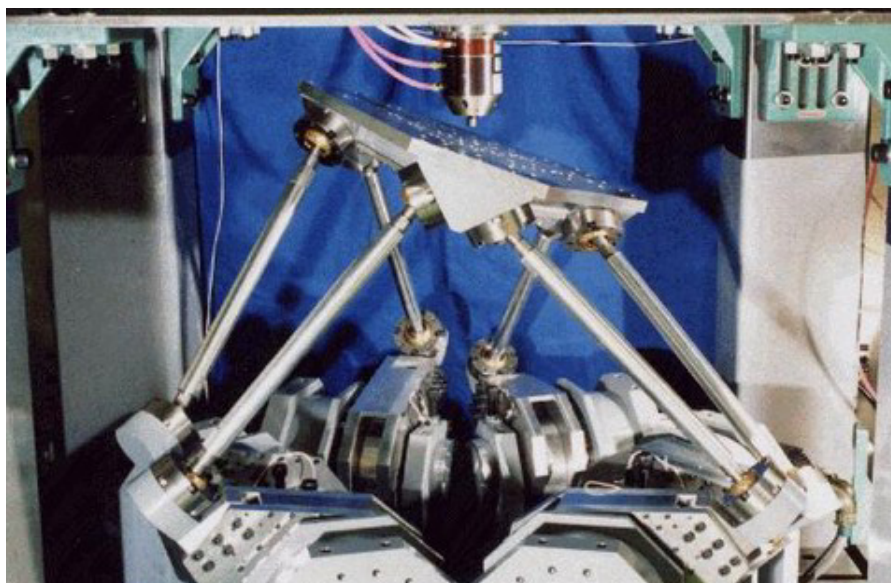


Рис. 3.41. Шести координатный поворотный стол по схеме «ротопод»



Рис. 3.42. Схема дельта-механизма

Главным достоинством предложенной схемы является ее повышенная маневренность и расширенная граница рабочей зоны.

### **Трипод.**

Трипод (рис. 3.43) является трехосевым механизмом, реализующим линейные перемещения исполнительного звена по трем осям



$X, Y, Z$ . В целом трипод является «упрощенной» версией гексапода. Однако, есть и отличия. Так как три штанги не могут обеспечить угловую жесткость, в конструкцию вводят четвертую центральную штангу, главной задачей которой является воспринимать изгибные напряжения.

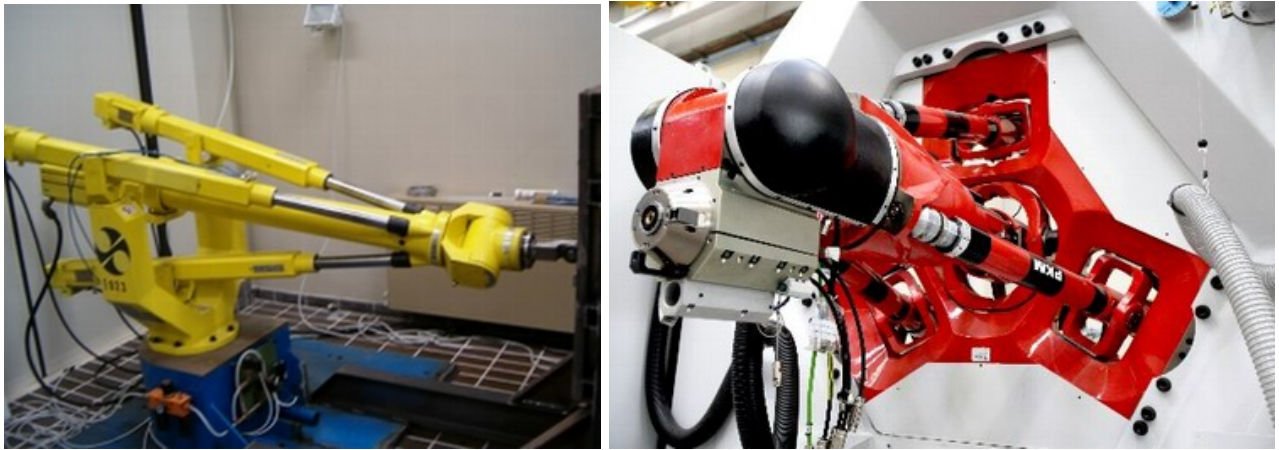


Рис. 3.43. Промышленные роботы линейки Tricert

Преимущества механизмов с параллельной структурой:

- при малой массе подвижного исполнительного органа обеспечиваются более высокие скорости перемещений и ускорений;
- механизмы отличаются высокой жесткостью, что обусловлено работой телескопического устройства на растяжение-сжатие и равномерным распределением усилий по всей структуре;
- резкое снижение металлоемкости.

### *3.9.2 Машины-гексаподы в машиностроении*

Это технологические машины, в т. ч. роботы, обрабатывающие станки, координатно-измерительные машины, в основе конструктивной схемы которых находится т.н. платформа Стюарта, хотя справедливее ее называть платформа Гью. Эта платформа впервые упоминается в статье В. Е. Гью (англ. V.E. Gough) в 1956 году. Механизм имеет шесть независимых ног на шарнирных соединениях. Длины ног можно изменять и, тем самым, можно изменять ориентацию платформы. Имя Стюарта ассоциируется с этим механизмом потому, что первоначальная работа Гью (и фотография его платформы) была упомянута в примечаниях рецензента к статье Д. Стюарта (англ. D. Stewart) в 1965 году. Сам Стюарт в той статье предложил другой гибридный трехногий механизм, имевший по два мотора на каждой ноге. Часто платформу именуют платформой Гью-Стюарта.

Компания Geodetic Technology зарегистрировала товарный знак «шестиножник» (англ. – hexapod) для платформ Гью – Стюарта, используемых в машиностроении. Однако это не помешало другим машиностроительным фирмам использовать этот термин – гексапод.

Итак, гексаподы имеют стержневую конструкцию и построены на мехатронных модулях линейного движения – каждая нога представляет собой мехатронный модуль (рис. 3.44).

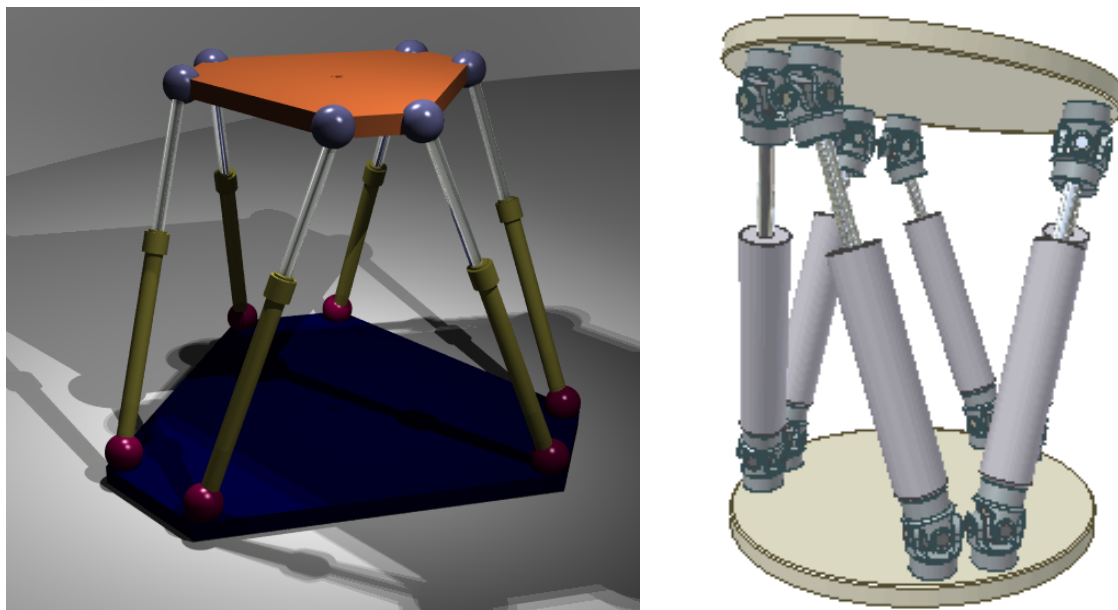


Рис. 3.44. Принципиальная схема гексаподов

Платформа Гью – Стюарта применяется в станкостроении, подводных исследованиях, авиационных спасательных операциях на море, летательных тренажерах, позиционировании спутниковых антенн, в телескопах, в ортопедической хирургии.

Станок-гексапод (рис. 3.45) выполнен на базе линейных мехатронных модулей, которые осуществляют осевое перемещение винтов через шарико-винтовые передачи (ШВП). Один конец ШВП соединен безлюфтовым шарниром с нижней платформой, а другой – с подвижной верхней платформой, на которой расположен рабочий орган – инструментальная головка. Управляя положением винтов (рис. 3.45), можно обеспечить пространственное перемещение рабочего органа по шести степеням свободы (возможно как раз отсюда и название – гексапод), что расширяет технологические возможности станка.

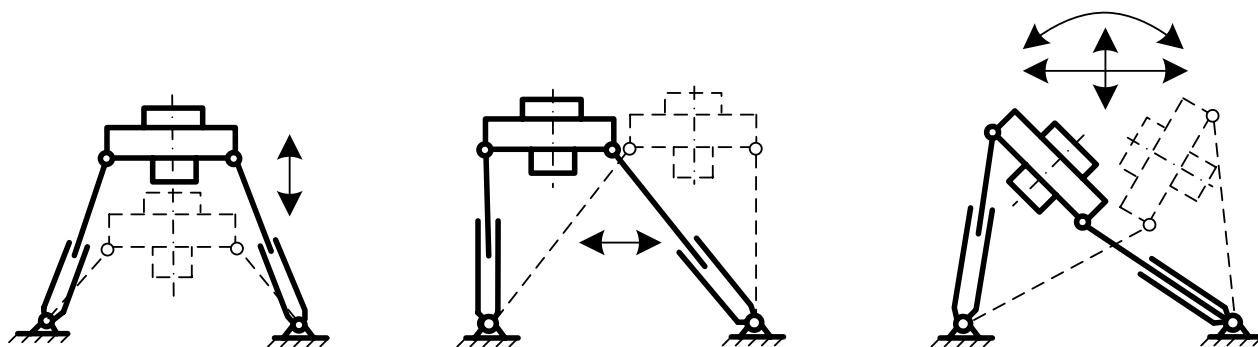


Рис. 3.45. Возможные положения рабочей головки станка-гексапода

Основными преимуществами гексаподных машин определены следующие:

- сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;

- высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз), применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);

- повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);

- отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), отсюда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;

- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления и сборки машины и конструктивную гибкость;

- высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов, применению линейных мехатронных модулей движения как объектов управления, использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ, наличию дружелюбного интерфейса «человек-машина».

На ООО «Лапик» (г. Саратов) выпускается прецизионное оборудование двух типов на единой конструктивной базе гексаподов: 6-осевые координатно-измерительные машины (КИМ) и технологические модули (ТМ) для механообработки (рис. 3.46).



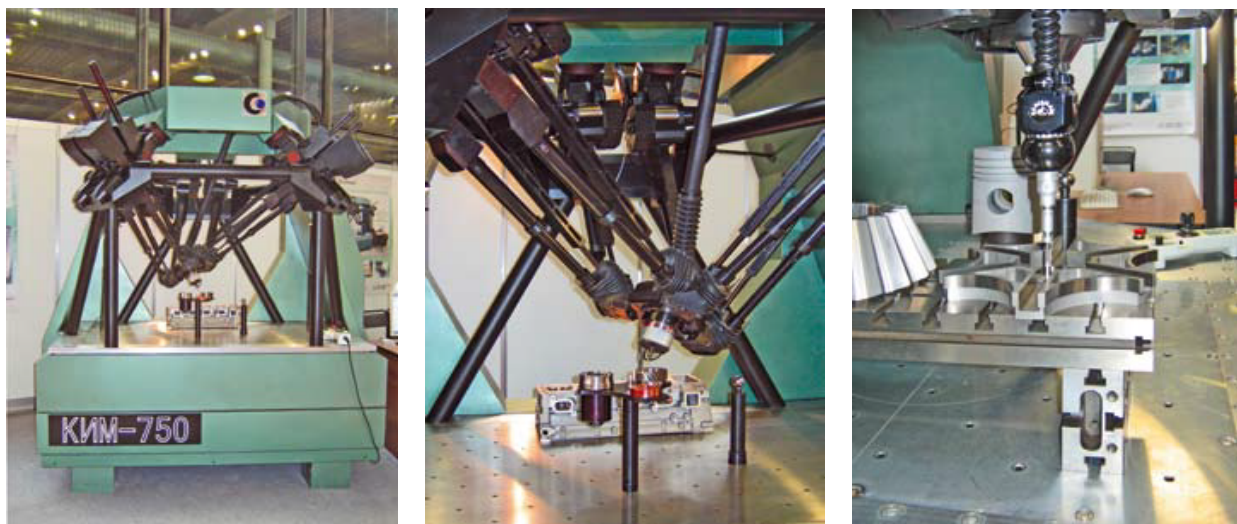


Рис. 3.46. Общий вид технологической машины-гексапода

Технологические модули предназначены для фасонной обработки с высокой точностью изделий методами фрезерования, шлифования, сверления, полирования, а также для выполнения операций гравировки, растачивания, разметки. Все они относятся к обрабатывающим системам. Точность позиционирования их исполнительных органов в пространстве – не менее 25 мкм. Но для измерительных систем такой точности явно недостаточно. Поэтому серийные КИМ, выпускаемые компанией «Лапик», определяют погрешность изготовления деталей в пределах нескольких микрон. Это лучшие показатели в мире.

Максимальный угол поворота подвижной платформы относительно каждой из осей составляет в серийных моделях 30 град, скорость ее движения управляется программно в интервале 0,01-120 мм/с.

Гексаподы имеют весьма эффективные массогабаритные показатели по сравнению со станками традиционной компоновки.

Среди промышленных моделей металлообрабатывающих станков-гексаподов можно отметить следующие:

- пятикоординатный обрабатывающий центр ГЕКСАМЕХ-1 и многофункциональный технологический модуль ТМ-1000 Савеловского машиностроительного открытого акционерного общества «САВМА» (рис. 3.47);

- широкоуниверсальный обрабатывающий центр Octahedral Hexapod НОН-600 фирмы Ingersoll (рис. 3.48);

- широкоуниверсальный обрабатывающий центр Octahedral Hexapod НОН-1000 фирмы Ingersoll;

- широкоуниверсальный обрабатывающий центр НехаМ фирмы Toyota Machine Works;
- широкоуниверсальный обрабатывающий центр VerticalLine V100 фирмы INDEX-Werke и др.



Рис. 3.47. Многофункциональный технологический модуль ТМ-1000



Рис. 3.48. Широкоуниверсальный обрабатывающий центр Octahedral Hexapod HON-600

Обзор современного состояния металлорежущего оборудования показывает, что оборудование этого класса активно производится многими ведущими российскими и иностранными компаниями и востребовано на мировом рынке. Технические характеристики превосходят соответствующие характеристики станков обычной компоновки.

## **Вопросы для самопроверки**



1. Что понимается под словом «робот»?
2. Как классифицируются роботы по степени участия человека в их управлении?
3. Как классифицируются роботы по типу решаемых задач?
4. Как классифицируются промышленные роботы?
5. Как классифицируются роботы по быстродействию и точности движений?
6. Что понимается под терминами «робототехнические системы» и «роботизированными технологическими комплексами»?
7. Что представляет собой гибкая автоматизированная производственная система в машиностроении?
8. Что представляет собой гибкий производственный модуль в машиностроении?
9. Что представляет собой однопоточная роботизированная технологическая линия?
10. На каких операциях в машиностроении получили распространение роботизированные технологические комплексы?
11. Возможно ли создание сборочных робототехнических комплексов?
12. Могут ли роботы выполнять непосредственно основные технологические операции, оперируя инструментом?
13. На каких операциях наиболее широко используются робототехнические комплексы на автосборочных заводах?
14. Каково назначение робототехнических комплексов, применяемых в системе гражданской защиты?
15. Каковы основные направления развития медицинской мехатроники?
16. Роботы для реабилитации инвалидов – для решения каких задач они предназначены?
17. Для решения каких задач предназначены медицинские роботы сервисного назначения?
18. Для решения каких задач предназначены клинические роботы?

19. Из каких основных частей состоят рентгеновские томографы?
20. Какой принцип действия рентгеновского томографа?
21. Какова роль роботов в при проведении сложных хирургических операций?
22. Каковы факторы, сдерживающие применение мехатронных устройств в медицинской практике?
23. Какие мехатронные устройства имеются в компьютерах?
24. Какие мехатронные системы нашли применение в быту и как широко используются бытовые роботы?
25. Автомобиль, как мехатронная система, какие основные мехатронные подсистемы и модули содержит в себе?
26. В чем различие и в чем сходство мехатронных систем автомобиля – антиблокировочной системы тормозов системы тягового контроля?
27. Регулирование каких параметров обеспечивает система управления работой двигателя?
28. На показания каких датчиков ориентируется система управления работой двигателя автомобиля?
29. Что обеспечивает система управления подвеской и показания каких датчиков необходимы для ее функционирования?
30. Как происходит срабатывание подушки безопасности?
31. Какие задачи решает интегрированная навигационная система?
32. Что собой представляет система GPS?
33. В чем состоит отличие радара и лидара (лидара)?
34. Откуда черпает информацию об окружающей среде беспилотный автомобиль-робот?
35. Какие системы поезда можно отнести к мехатронным?
36. Как достигается оптимальный процесс торможения поезда?
37. Что входит в дверные системы поезда?
38. Зачем создают дверные системы на перронах?
39. Что относится к легким транспортным средствам и можно ли их отнести к мехатронным системам?

40. В чем состоит особенность электровелосипедов?
41. Что собой представляют электророллеры?
42. Какие преимущества создает комплексная автоматическая система удержания судна на заданной траектории?
43. Как в общих чертах функционирует система дистанционного управления полетом ДПЛА – НІМАТ?
44. Какую пользу приносят мехатронные системы транспортировки, паллетирования и складирования?
45. Как производится ремонт подземных трубопроводов с помощью мобильных роботов?
46. Какими возможностями обладает мобильный робот военного назначения BigDog?
47. Какие требования выдвинуты к разработчикам боевого варианта робота BigDog?
48. Какие функции выполняют безэкипажные патрульные катера?
49. Какие функции выполняют необитаемые подводные аппараты?
50. Какие функции выполняют беспилотные летательные аппараты?
51. Зачем в Израиле разработали миниатюрный летательный аппарат в виде стрекозы?
52. В чем состоит разница схем механических рук промышленных роботов содержащих двигатель вращения и линейный двигатель?
53. В чем состоит принципиальная схема станка-гексапода?
54. В чем состоит отличие схемы гексапода от схемы ротопода?
55. В чем состоит отличие схемы трипода от схемы гексапода?
56. Какие основные преимущества гексаподных машин в машиностроении?
57. Приведите примеры робототехнических комплексов в машиностроении.
58. Какие известны промышленные роботы по назначению и по степени специализации?

### **Список литературы к разделу 3**



1. Аликин В.Д., Даций Д.А. Металлорежущие станки с параллельной кинематикой. Сибирский федеральный университет. [Электронный ресурс]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru> (дата обращения: 07.09.2013).
2. Артамкин Е.Ю. Классификация роботов и их применение. Ddoctus, 14-06-2007 [Электронный ресурс]. URL: [www.doctus.ru](http://www.doctus.ru) (дата обращения: 17.09.2013).
3. Белоусов А.Н. ООО «Юкам-груп». Мехатронные системы транспортировки, паллетирования и складирования в ликероводочных и винодельческих производствах / А.Н. Белоусов // Ликероводочное производство и виноделие. – М., 2011. – № 6(138). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ukam.ru> (дата обращения: 15.09.2013).
4. Бойченко С.Г. КИМ на гексаподах: «русское чудо» в технологиях измерений. Оборудование и инструмент / С.Г. Бойченко. – К., 2005. – №12. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lapic.ru> (дата обращения: 17.09.2013).
5. Владимир Щербаков. Война на море – эпоха машин. Вокруг Света. 2013. №11. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vokrugsveta.ru> (дата обращения: 01.11.2013).
6. Галямов И. Введение в параллельные механизмы. Клуб «Трех инженеров». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.3e-club.ru> (дата обращения: 28.09.2013).
7. Гибкие автоматизированные производственные системы и робототехника. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.carmultisystem.ru> (дата обращения: 21.09.2013).
8. Дорнбергер В. Классификация промышленных роботов. [Электронный ресурс] // Киборги. URL: [kiborgs.ru](http://kiborgs.ru) (дата обращения: 18.09.2013).
9. Как делают машины на АвтоВАЗе / Фото-новости – Love Opium. [Электронный ресурс]. URL: [loveopium.ru](http://loveopium.ru) (дата обращения: 15.10.2013).
10. Классификация производственных систем. [Электронный ресурс] // Новая лаборатория автоматизации. URL: [automationlab.ru](http://automationlab.ru) (дата обращения: 19.09.2013).

11. Лекции по мехатронике. [Электронный ресурс]. URL: gendocs.ru (дата обращения: 17.09.2013).
12. Обработка нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнов, В.Е. Ковалев и др.; под ред. В.Л. Афонова. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с.
13. Перспективы развития боевой беспилотной авиации. Memoid. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.memoid.ru> (дата обращения: 25.10.2013).
14. Подленко О.Н. Гексаподы. [Электронный ресурс]. URL: <http://podlenko.narod.ru> (дата обращения: 23.10.2013).
15. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов / Ю.В. Подленко. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
16. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: учеб. пособ. / Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «Станкин», 2000 – 80 с.
17. Пятифан. Лекция: Мехатронные транспортные средства, устройства бытового и медицинского назначения. Периферийные устройства компьютеров как мехатронные объекты. [Электронный ресурс]. URL: 5fan.ru (дата обращения: 28.10.2013).
18. Робототехнические системы и комплексы: учебное пособие для вузов / И.И. Мачульский, В.П. Запятой, Ю.П. Майоров и др.; под ред. И.И. Мачульского. – М.: Транспорт, 1999. – 446 с.
19. Тарабарин В.Б. Конспект лекций. Промышленные роботы и манипуляторы. [Электронный ресурс]. URL: [tmm-umk.bmstu.ru](http://tmm-umk.bmstu.ru) (дата обращения: 19.09.2013).
20. Техномания. Четвероногий робот установил рекорд скорости. [Электронный ресурс]. URL: <http://texnomaniya.ru> (дата обращения: 21.10.2013).
21. Транспортный робот BigDog стал тише, быстрее и умнее. [Электронный ресурс]. URL: [www.vesti.ru](http://www.vesti.ru) (дата обращения: 21.10.2013).
22. Хомченко В. Г. Мехатронные и робототехнические системы: учеб. пособие / В. Г. Хомченко, В. Ю. Соломин. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 160 с.

23. Эстонские электро-роллеры Eho Bikes вырвались на волю. [Электронный ресурс]. URL: <http://rus.delfi.ee> (дата обращения: 19.09.2013).

24. Autoexpert.in.ua. Захватывающий электророллер Lit C-1: все под контролем! [Электронный ресурс]. URL: <http://www.autoexpert.in.ua> (дата обращения: 15.09.2013).

25. BionX. Интеллектуальные системы электроприводов для велосипедов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bion-x.ru> (дата обращения: 15.05.2013).

26. Daily Tech Info. Робототехника. 25 сентября 2013. Компания Boston Dynamics начинает разработку «боевого варианта» четвероногого робота BigDog. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dailytechinfo.org> (дата обращения: 22.10.2013).

27. Daily Tech Info. Робототехника. 4 марта 2013. Робот BigDog швыряется большими шлакоблоками с помощью сильной руки-манипулятора. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dailytechinfo.org> (дата обращения: 22.10.2013).

28. Hyundai Solaris клуб Россия. Производство Hyundai Solaris в России. [Электронный ресурс]. URL: [solaris-club.net](http://solaris-club.net) (дата обращения: 18.10.2013).

29. Knorr-Bremse Россия. Продукция для рельсового транспорта. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.knorr-bremse.ru> (дата обращения: 15.10.2013).

30. Stanley: The Robot That Won The DARPA Grand Challenge. [Электронный ресурс]. URL: [ai.stanford.edu](http://ai.stanford.edu) (дата обращения: 15.10.2013).

31. Zelisko. Безопасность транспорта и дорожного движения. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zelisko.at> (дата обращения: 15.10.2013).



### **4.1 Основы конструирования мехатронных систем**

Основой методов конструирования мехатронных устройств является интеграция составляющих частей, которая определяется на этапе проектирования и реализуется при производстве и эксплуатации мехатронных модулей и систем. Интеграция в пределах мехатронного устройства выполняется посредством объединения компонентов и через интеграцию обработки информации. На рис. 4.1 представлены такие компоненты, которые могут быть объединены.



Рис. 4.1. Интеграция составных частей мехатронного устройства

На современном этапе развития мехатроники актуальным является решение следующих интеграционных задач:

- функциональная, структурная и конструктивная интеграция элементов;
- аппаратно-программная интеграция исполнительных и интеллектуальных элементов в мехатронных модулях;
- разработка и внедрение гибридных технологий производства интегрированных модулей и машин;
- создание информационных сред для поддержки решений междисциплинарных мехатронных задач;
- построение математических и компьютерных моделей мехатронных модулей и систем, отражающих их интеграционную специфику;
- применение интеграционных подходов в организационно-экономической деятельности предприятий, выпускающих мехатронные изделия;
- междисциплинарная подготовка специалистов, способных к системной интеграции в области мехатроники.

Рассмотрим иерархию уровней интеграции в мехатронных системах.

Первый уровень интеграции образуют мехатронные устройства и составляющие их элементы.

Второй уровень включает интегрированные мехатронные модули. Набор мехатронных устройств определяет тип мехатронного модуля (рис. 4.2). В общем случае для интеллектуального модуля можно выделить две основные группы устройств (см. рис. 2.1): в исполнительную группу входят механические устройства и двигатели, а группа интеллектуальных устройств является совокупностью электронных, информационных и управляющих компонентов.

На третьем уровне интеграции из мехатронных модулей komponуются многокоординатные мехатронные машины.

Высший (четвертый) уровень предполагает построение на единой интеграционной платформе комплексов мехатронных машин для реконфигурируемого производства.

В целом проектирование мехатронных систем является сложной многофакторной проблемой выбора и оптимизации принимаемых технических и технологических, организационно-экономических и

информационных решений. Одна из важных проектной задачей является интеграция элементов в мехатронных модулях и машинах.

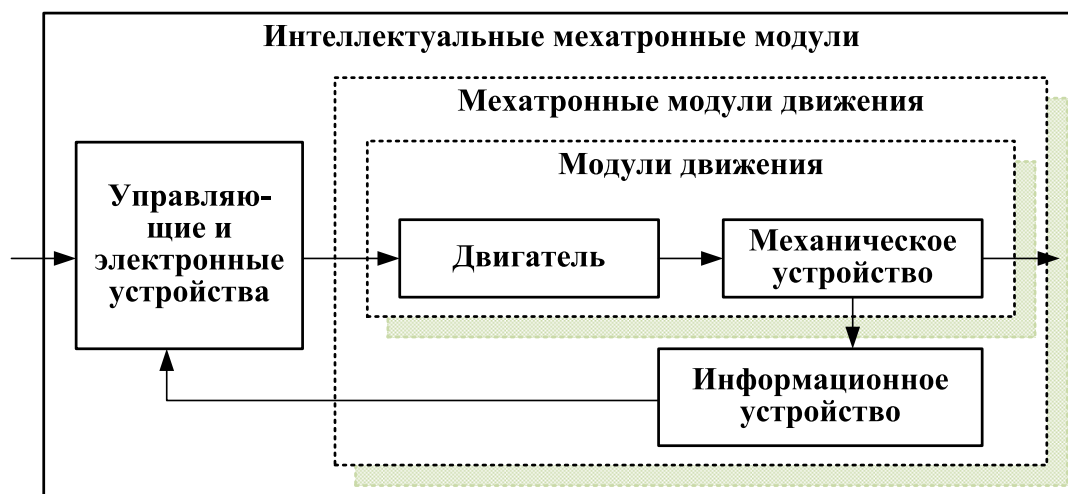


Рис. 4.2. Классификация мехатронных модулей

Узким местом мехатронных модулей и машин являются интерфейсы между составляющими устройствами и элементами.

Понятие «интерфейс» является ключевым для предлагаемого подхода к проектированию мехатронных модулей и систем. В первую очередь отметим, что взаимодействие основных устройств в мехатронной системе (см. рис. 2.1) осуществляется не напрямую, а через некоторые соединительные блоки, обозначенные на рисунке стрелками. С физической и технической точки зрения устройства могут различаться, но иметь одинаковое функциональное назначение. Их основная функция – это выполнение энергетического и информационного обмена между сопрягаемыми структурными элементами системы.

Место интерфейса в структуре мехатронной системы задается связями с входными и выходными устройствами. Технические характеристики интерфейса определяются способом и процедурой передачи (при необходимости – преобразования, хранения и синхронизации) воздействий, сигналов и информации, а также аппаратно-программной реализацией используемых каналов связи.

В табл. 4.1 перечислены основные мехатронные интерфейсы, обозначенные направленными стрелками в обобщенной структуре мехатронных машин (см. рис. 2.1).

## Основные интерфейсы мехатронной системы

Устройство на входе	Устройство на выходе	Передаваемые воздействия / сигналы / информация
Оператор или компьютер верхнего уровня	Устройство компьютерного управления	Цель движения
Устройство компьютерного управления	Силовые электронные преобразователи	Сигналы управления приводами
Силовые электронные преобразователи	Исполнительные двигатели	Управляющие напряжения
Исполнительные двигатели	Механическое устройство	Движущие силы и моменты
Механическое устройство	Информационное устройство	Информация о состоянии механического устройства
Исполнительные двигатели	Информационное устройство	Информация о состоянии двигателей
Информационное устройство	Устройство компьютерного управления	Сигналы обратной связи

В табл. 4.1 многочисленные интерфейсы в мехатронной машине связывают устройства различной физической природы (механические, электронные и информационные), что предопределяет их конструктивную и аппаратно-программную сложность. При традиционном проектировании интерфейсы представляют собой самостоятельные устройства и узлы.

Если блоки, как правило, выпускаются специализированными фирмами, то многие интерфейсы разрабатываются и изготавливаются самостоятельно пользователями. При проектировании машины с компьютерным управлением по трем координатам, построенной на традиционных приводах, для связи основных устройств необходимо соединить порядка 100 сигнальных и силовых проводов. Опыт эксплуатации комплексных машин и систем показывает, что до 70 % проблем их функционирования связаны с надежностью связей и соединений.

Суть мехатронного подхода состоит в объединении элементов в интегрированные модули уже на этапах проектирования и изготовления, освобождая конечного потребителя от проблем при эксплуатации мехатронной машины.

Интегрированные мехатронные машины отличаются повышенной надежностью, устойчивостью к неблагоприятным внешним воздействиям, точностью выполнения движений, модульностью и компактностью конструкции. С точки зрения потребителя – это целостные изделия, удобные при настройке и программировании движений. Интегрированные решения экономически целесообразны благодаря упрощению сервиса машины и повышения ее ремонтпригодности.

Системы с глубокой степенью интеграции элементов имеют и обратную сторону – такие машины являются менее гибкими (имеют ограниченные возможности для модернизации и реконфигурации). Поэтому мехатронные модули различного уровня интеграции позволяют выявлять рациональную структуру под конкретные задачи автоматизации.

Идея интеграции широко используется в инженерной практике при проектировании устройств и систем самого различного назначения. Характерным примером реализации этой инженерной идеи в бытовой технике является MP3-Player – современное цифровое устройство, в котором объединены аудио-плеер, радиоприемник, диктофон и магнитофон. Очевидны преимущества этого комбинированного устройства – многофункциональность, компактность, экономичность, удобство (пользователь освобожден от проблем с подключением кабелей и разъемов). Но эта система негибкая, отдельные ее компоненты нельзя заменить и модернизировать, все они могут эксплуатироваться и ремонтироваться только совместно.

Решение «проблемы интерфейсов» в мехатронике можно трактовать как задачу минимизации структурной сложности мехатронной системы. Структурная сложность комплексных систем в общем случае определяется количеством соединяемых элементов, числом и интенсивностью их взаимосвязей.

В основе данного подхода лежат три фундаментальных направления теории системного проектирования сложных систем:

- функционально-структурный анализ и эволюционный синтез технических систем;
- методология параллельного проектирования систем;
- структурный синтез и оптимизация технических систем по критериям сложности.

Ключевые положения перечисленных направлений.

Функционально-структурный подход базируется на идее приоритета функции системы над ее структурной организацией. Задачей

проектирования является определение такой структуры, которая позволит системе выполнять заданные функциональные задачи с максимальной эффективностью по выбранным критериям качества. Основные положения этого метода разработаны применительно к задачам проектирования информационно-управляющих комплексов и вычислительных устройств.

Метод эволюционного синтеза предусматривает нахождение рациональных решений путем многоэтапной процедуры оптимизации. Поиск вариантов производится из базы перспективных структурных решений, которая открыта для редактирования (совершенствования) и имеет иерархическую структуру. Такой метод проектирования позволяет повысить качество проекта и снизить требования к опыту разработчика.

Методологической основой для разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования. При традиционном проектировании разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Традиционный алгоритм проектирования

Задачами системной интеграции занимается разработчик системы управления. Его возможности ограничены, так как основные конструкторские решения принимаются на предыдущих этапах. Выбранные двигатели и механические устройства относятся к неизменяемой части, состав и характеристики которой не корректируются при разработке электронной и управляющей частей.

Методология параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех устройств мехатронной системы (рис. 4.4).

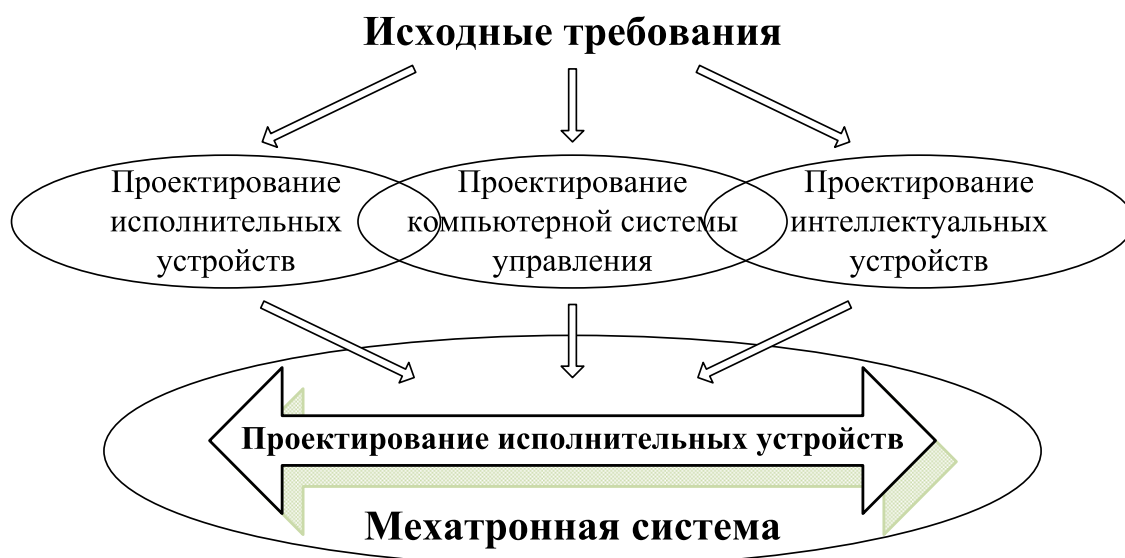


Рис. 4.4. Алгоритм параллельного проектирования мехатронных систем

Одна из известных процедур проектирования интегрированных мехатронных машин представлена на рис. 4.5.

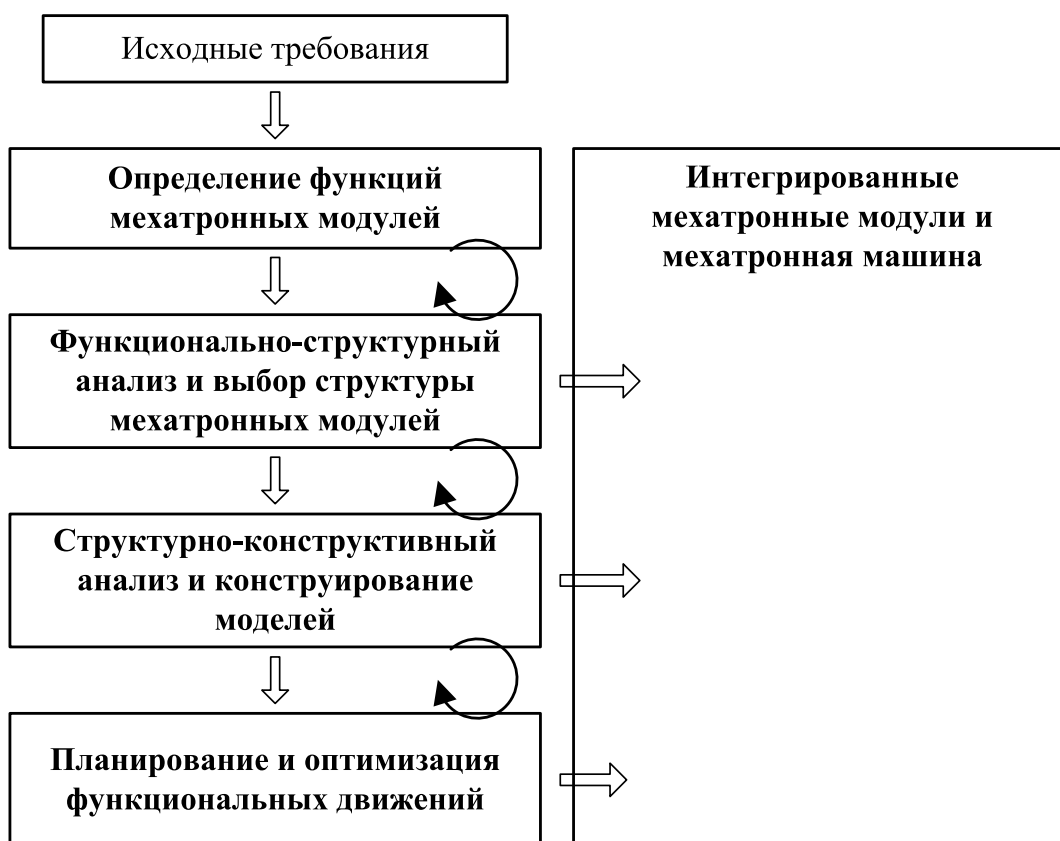


Рис. 4.5. Процедура проектирования интегрированных мехатронных машин

Эта процедура (рис. 4.5) предусматривает четыре взаимосвязанных этапа:

- определение функций мехатронных модулей на основе анализа исходных требований к мехатронной машине;
- функционально-структурный анализ с целью выбора и формирования структуры всех мехатронных модулей системы;
- структурно-конструктивный анализ, конструирование и формирование модели модулей системы;
- планирование и оптимизация функциональных движений, разработка программ движения машины и ее модулей.

Исходные требования к мехатронным машинам, определяющие основные проектные решения, формируются путем анализа выполняемых технологических операций. Для примера в табл. 4.2 приведены предпочтительные значения параметров контурного движения рабочего органа для роботизированных операций.

Таблица 4.2

Примеры предпочтительных значений параметров движения рабочего органа роботизированного комплекса (мехатронной системы)

Технологическая операция	Максимальная скорость, мм/с	Отношение рабочих скоростей, $V_{\max}/V_{\min}$	Погрешность отработки траектории, мм
Лазерная резка	66,7	66,7	0,05
Воздушно-плазменная резка	83,3	5,0	0,10
Окраска распылением	500,0	10,0	5,00
Дуговая сварка	11,0	2,2	0,50

Рекомендации технологов, как правило, ограничиваются выбором номинальных режимов движения машины. При проектировании мехатронной системы, как правило, задают исходные данные, включающие информацию о программируемых движениях и комплексе ограничений.

Требования к траекториям движения содержат описание программируемых траекторий рабочего органа в пространстве и допустимую погрешность их отработки. Траектории рабочего органа определяются геометрией контуров и поверхностей объектов работ. Например, формой лопатки газотурбинного двигателя.



Требуется, чтобы погрешность обработки траектории не превышала допустимые значения  $\delta_{\text{доп}}$ :

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}; \quad |\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{\text{доп}}; \quad \left| \frac{v}{v_{\text{ном}}} - 1 \right| \leq \Delta v_{\text{доп}}; \quad |F| \leq F_{\text{доп}}. \quad (4.1)$$

Система неравенств (4.1) задает также ограничения на погрешности ориентации  $\Delta\alpha$  рабочего органа, допустимое отклонение  $\Delta v_{\text{доп}}$  фактической скорости движения  $v$  от номинального значения  $v_{\text{ном}}$ , ограничение на предельную величину развиваемой силы  $F_{\text{доп}}$ .

При проектировании системы управления рекомендуется использовать следующие показатели добротности:

$$D_v = \frac{v_{\text{max}}}{\delta_{\text{доп}}}; \quad D_a = \frac{v_{\text{max}}^2}{\delta_{\text{доп}} R_{\text{min}}}; \quad D_F = \frac{F_{\text{max}}}{\delta_{\text{доп}}}, \quad (4.2)$$

где  $D_v$ ,  $D_a$ ,  $D_F$  – соответственно показатели добротности по скорости, ускорению и силе;  $v_{\text{max}}$ ,  $F_{\text{max}}$  – максимальные значения соответственно контурной скорости и силы;  $R_{\text{min}}$  – минимальный радиус кривизны траектории.

На следующем этапе проектирования формируется структура мехатронных модулей со схемой энергетических и информационных потоков. На третьем этапе проводится конструирование модулей и мехатронной машины в целом. Применяя процедуры функционально-структурного и структурно-конструктивного анализа оцениваются проектные варианты для обеспечения высокого уровня интеграции элементов. Задача проектирования, таким образом, заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и техническим исполнением.

Построение функциональной, структурной и конструктивной моделей позволяет применять в мехатронике методы и средства автоматизированного анализа, проектирования и конструирования.

На заключительном этапе данной процедуры выполняется планирование и оптимизация функциональных движений мехатронной машины (см. гл. 7). Результатом этого этапа является создание программ управления этими движениями.

Все проектные этапы имеют циклический характер, что отмечено круговыми стрелками на рис. 4.5. Например, на втором

этапе прямая задача состоит в определении структуры модулей по заданной функциональной модели. Но возможна и обратная задача, когда структурные модификации приводят к изменению функциональных возможностей системы.

При проектировании интегрированных мехатронных модулей могут использовать три метода интеграции. Методы интеграции можно классифицировать по характеру объединения составляющих устройств и способу решения «проблемы интерфейсов» мехатронных систем. Каждый из методов может применяться как самостоятельно, так и в комбинации с другими методами, поскольку они реализуются на различных этапах проектирования.

Первый метод состоит в построении интегрированных мехатронных машин путем исключения из их структуры промежуточных преобразователей и соответствующих интерфейсов. Это наиболее глубокий уровень интеграции, исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации в мехатронных системах создает фундаментальную основу для достижения их высокой точности и быстродействия, компактности и надежности.

Второй метод предполагает аппаратно-конструктивное объединение устройств различной физической природы в едином корпусе многофункционального мехатронного модуля. В результате такие модули движения представляются едиными изделиями.

Третий метод интеграции (наиболее современный) заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным). Интеллектуальные устройства, в отличие от механических, придают системе гибкость, поскольку их легко перепрограммировать под новую задачу. Данный метод позволяет обеспечить постоянное снижение себестоимости устройств путем минимизации механической сложности мехатронной системы, при расширении функциональных возможностей.

#### ***4.2 Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов***

Применение этого метода интеграции обеспечивает минимизацию структурной сложности мехатронных модулей путем исключения промежуточных преобразователей. При проектировании из

традиционной структуры исключают промежуточные блоки и соответствующие интерфейсы, сохраняя функциональное преобразование, выполняемое мехатронным модулем в целом, его входные и выходные переменные. Метод реализуется, как правило, на втором этапе проектирования мехатронных систем (см. рис. 4.5) при синтезе структуры модулей.

Структурные решения для мехатронных систем выявляются с помощью методики функционально-структурного анализа проектных решений.

Известны два основных подхода к построению моделей сложных технических систем. Первый заключается в функциональном определении рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. Второй подход основан на структурном представлении системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязей между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который применяют к задачам мехатроники.

Для методически корректного проектирования необходимо рассмотреть функциональную организацию мехатронной системы. Функциональное представление с определенными входными и выходными переменными (модель типа «черный ящик») представлено на рис. 4.6. Главная функциональная задача мехатронной системы заключается в преобразовании информации о программе движения в управляемое движение ее конечного звена.

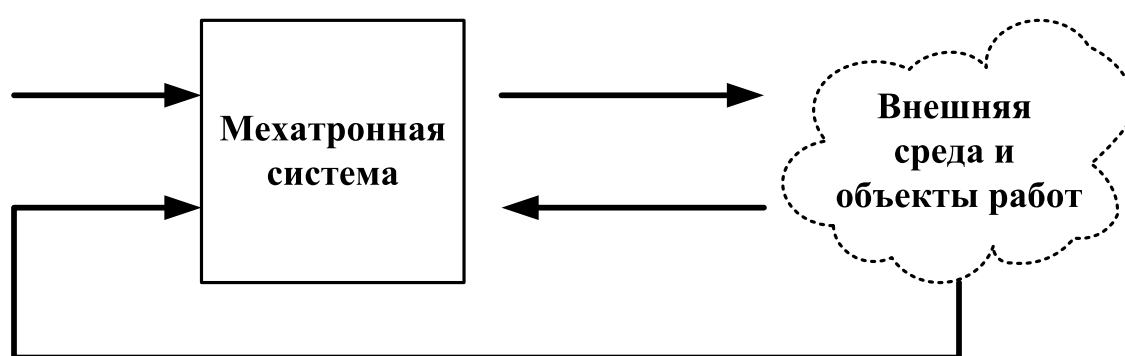


Рис. 4.6. Функциональное представление мехатронной системы

Программа движения задается компьютером или оператором (см. рис. 2.2). Управляемое движение осуществляется звеньями механического устройства, причем конечное звено – рабочий орган взаимо-

действует с внешней средой. В процессе движения на механическое устройство действуют внешние силы со стороны объектов работ (например, силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке). Информационная обратная связь необходима для оценки в режиме реального времени текущего состояния управляемой системы и внешней среды.

Выделенная основная функция не обязательно является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие как: реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для ее эффективной и надежной работы. Но именно выполнение заданного функционального движения является главной функцией, которая определяет поведение мехатронной системы во внешней среде.

Функциональное представление мехатронного модуля в форме «черного ящика» (см. рис. 4.6) содержит два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), дополнительный механический вход (силы реакции внешней среды) и один выход – целенаправленное механическое движение. Следовательно, в общем случае функциональная схема мехатронного модуля может быть построена как информационно-механический преобразователь.

Физическая реализация мехатронного информационно-механического преобразования осуществляется путем использования электрических источников энергии. Соответственно функциональная модель для современных мехатронных систем представлена на рис. 4.7.

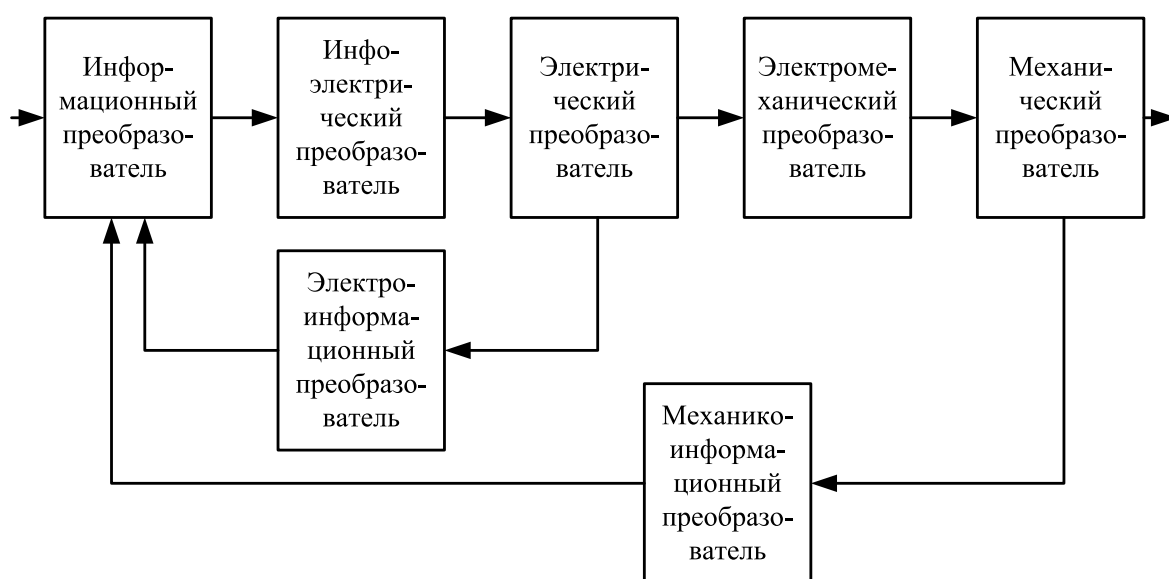


Рис. 4.7. Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная функциональная модель в общем случае содержит семь базовых преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением.

Выбор физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями применения. В мехатронных модулях широко применяют:

- гидравлические преобразователи, которые наиболее эффективны в машинах, испытывающих высокие нагрузки;
- пневматические преобразователи, которые характеризуются простотой, надежностью и обладают высоким быстродействием;
- химические преобразователи применяются в биоприводах, аналогичных по принципу действия мускулам живых организмов;
- тепловые энергетические процессы используются в микромехатронных системах с использованием материалов с памятью формы;
- комбинированные преобразователи, основанные на энергетических процессах различной физической природы.

В общем случае в мехатронном модуле (см. рис. 4.6) реализуется семь функциональных преобразований. Три моноэнергетические преобразователи (информационный, электрический и механический), у которых входные и выходные переменные имеют одну физическую природу. И четыре – дуальные (двойственные), у них входные и выходные переменные различных физических видов.

Структурная модель мехатронного модуля отражает состав его элементов и связи между ними. Структурные модели можно графически представить в виде блок-схем. В качестве исходной структуры мехатронного модуля представлен традиционный электропривод с компьютерным управлением (рис. 4.8).

В представленной структурной схеме выделяют управляющую и электромеханическую подсистемы. Структурная модель электропривода (см. рис. 4.8) включает в себя следующие элементы:

- устройство компьютерного управления движением (информационное преобразование: обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);

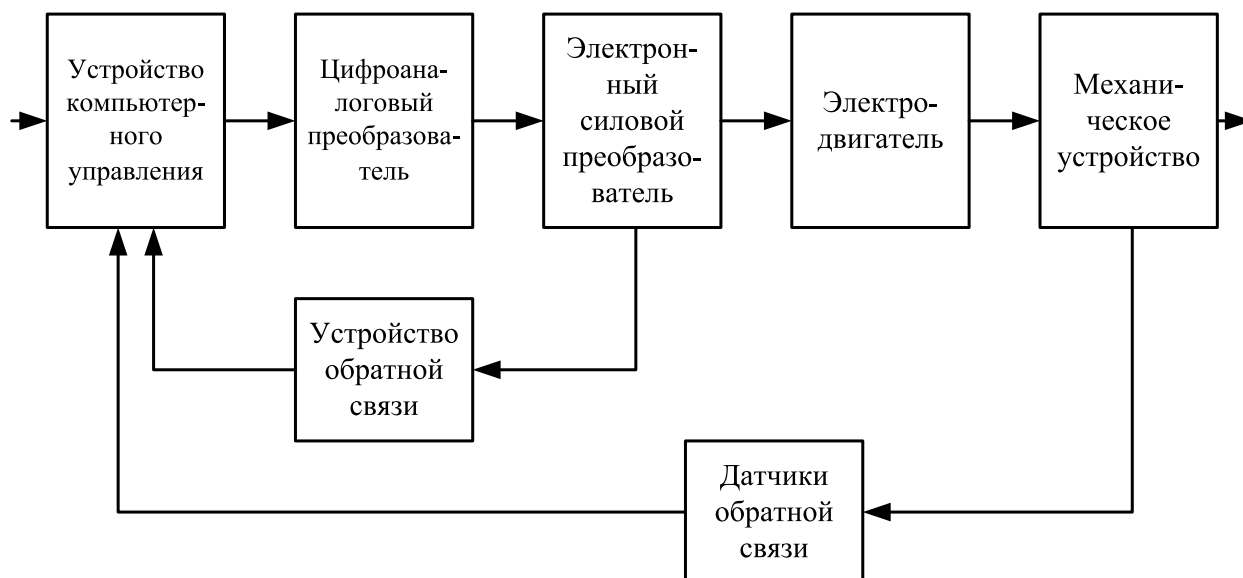


Рис. 4.8. Структура традиционного электропривода с компьютерным управлением

- цифроаналоговый преобразователь (функция информационно-электрического преобразования);
- силовой преобразователь, как правило, состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- управляемый электродвигатель (электромеханическое преобразование);
- механическое устройство (реализует заданное управляемое движение, и рабочий орган, взаимодействующий с внешними объектами);
- устройство обратной связи (дает информацию о значениях электрических напряжений и токов в силовом преобразователе);
- датчики обратной связи (по положению и скорости движения звеньев), выполняющие функцию механико-информационного преобразования;
- интерфейсные устройства *I0-I8*.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими, так и интеллектуальными преобразователями. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие механическое устройство с двигателем (интерфейс *I4*) и датчиками обратной связи *I7, I8*.

Интеллектуальные интерфейсы расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления мехатронного модуля и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- компьютером верхнего уровня управления и другими модулями мехатронной системы (интерфейс *I0*);
- цифроаналоговым преобразователем (интерфейс *I1*) и далее с силовым преобразователем модуля (*I2*);
- датчиками обратной связи (интерфейс *I8*), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя;
- устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (интерфейс *I6*).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются separatными устройствами. Поэтому их проектирование, изготовление и наладка становятся серьезной проблемой, особенно при требованиях надежного соединения нестандартных и специализированных элементов различных производителей.

Сравнение функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 4.7) и структурной модели традиционного электропривода (см. рис. 4.8), показывает, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число выполняемых функциональных преобразований. Это обстоятельство указывает на структурную избыточность традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей.

Задачей функционально-структурного анализа является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. Представленные решения основаны на совместном анализе функциональной модели мехатронного модуля и структуры традиционного электропривода (см. рис. 4.8 как *I0-I8*).

Примеры проектных решений для мехатронных модулей, основанные на рассматриваемом методе интеграции элементов, приведены в табл. 4.3.

Примеры проектирования решений для мехатронных модулей (см. рис. 4.8)

Мехатронное решение	Исключаемые промежуточные преобразователи		
	функциональные преобразователи	структурные блоки	интерфейсы
Вентильный высокомоментный двигатель	Механический	Механическое устройство	<i>I4</i>
Мехатронный модуль с «бессенсорным» управлением	Механико-информационный	Датчики обратной связи	<i>I7, I8</i>
Интеллектуальный силовой преобразователь	Электроинформационный	Устройство обратной связи	<i>I5</i>

Применение вентильных высокомоментных двигателей позволяет заменить пару «двигатель + механический преобразователь движения» на один исполнительный элемент – двигатель. Здесь исключается механический преобразователь из функциональной модели (см. рис. 4.7) и, соответственно, механическое устройство и интерфейс *I4* из традиционной структуры привода (см. рис. 4.8).

К основным преимуществам мехатронных модулей с вентильными высокомоментными двигателями относятся компактность и модульность конструкции, повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформаций звеньев, а также исключению трения в механической трансмиссии. В современных машинах используются такие двигатели – углового и линейного типов.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкцию такого двигателя встраивают датчик положения (обычно датчик Холла). В исполнительных приводах информацию с этого датчика можно использовать и как сигнал позиционной обратной связи. Следовательно, применение их со встроенными датчиками позволяет упростить не только исполнительную часть модуля, но и цепи обратной связи.

Построение мехатронных модулей с так называемым «бессенсорным» управлением означает исключение датчиков обратной связи вместе с соответствующими интерфейсами *I7* и *I8*, которые традиционно выполняют функциональное механико-информационное преобразование. При этом информация о скорости и положении ротора



двигателя определяется в устройстве компьютерного управления косвенными методами.

Данный способ позволяет существенно снизить стоимость изделия и повысить надежность его работы, радикально облегчить механическую конструкцию модуля, возложив задачу организации обратной связи на электронные и компьютерные устройства. Фактически в данном случае метод исключения промежуточных преобразователей сочетается с методом интеграции (гл. 4.3), который направлен на расширение функций интеллектуальных устройств в мехатронике.

Создание бессенсорных способов управления особенно актуально в настоящее время для мехатронных модулей на базе двигателей переменного тока, широкое применение которых сдерживалось отсутствием эффективных систем управления. Мировой рынок этих модулей оценивался в 2003 г. в 12 млрд. долл. и прогнозируется его дальнейший рост (около 12 % в год). Так как двигатели переменного тока обладают высоким показателем цена/качество по сравнению с машинами постоянного тока. Только за последние десять лет цена единицы мощности асинхронных машин снизилась примерно в 10 раз, при этом компактность конструкции улучшилась в 15 раз.

Проблемы практической реализации метода бессенсорного управления связаны с построением адекватных компьютерных моделей для процессов, протекающих в двигателях. Характер этих процессов существенно различается для участков разгона и торможения, движения с номинальной скоростью и в зоне малых скоростей, на холостом ходу и при наличии внешних моментов. Необходимым условием работоспособности такой системы является организация всех вычислительных процедур в реальном масштабе времени.

В состав современных мехатронных модулей входят интеллектуальные силовые преобразователи (см. табл. 4.3), объединяющие электрическое и электроинформационное преобразования. Особенность их состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Интеллектуальные силовые преобразователи строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с

изолированным затвором (IGBT) и запираемые тиристоры с полевым управлением (МСТ).

Использование интеллектуальных силовых преобразователей в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массо-габаритные показатели, повысить надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели мехатронных систем.

Перспективные решения на базе рассмотренного метода интеграции основываются на применении гибридных производственных технологий и новых конструкционных материалов, общих для исполнительных и интеллектуальных компонентов.

### ***4.3 Метод объединения элементов мехатронного модуля***

Целью метода интеграции является минимизация конструктивной сложности мехатронных модулей путем создания интегрированных мехатронных модулей, реализующих несколько функциональных и структурных преобразований. Эта цель может быть достигнута на третьем этапе проектирования мехатронных систем – этапе структурно-конструктивного анализа (см. рис. 4.8). Структуру модуля, которая сформирована на предыдущем этапе, теперь считаем известной. Задача разработки состоит в выборе конструктивных решений, реализуемых заданным набором элементов и связей между ними.

Рассматриваемый метод интеграции заключается в аппаратно-конструктивном объединении выбранных элементов и интерфейсов в едином корпусе. Технологической базой для данного метода интеграции является гибридная сборка узлов и элементов. Аппаратное и конструктивное объединение элементов в единые модули должно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения.

Методическим подходом поиска вариантов является рассмотрение интерфейсных блоков *I0-I8* (см. рис. 4.8) в качестве локальных точек, где потенциально возможна интеграция элементов. Для получения высокоинтегрированных модулей при проектировании можно базироваться на несколько интерфейсных точек одновременно.

Группы мехатронных модулей, построение которых основано на методе интеграции, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Мехатронные модули, построенные методом объединения  
элементов в едином корпусе

Многофункциональные мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
		структурные блоки	интерфейсы
Модули движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	<i>I4</i>
Мехатронные модули движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатель, механическое устройство, датчик обратной связи	<i>I4, I7</i>
Интеллектуальные мехатронные модули	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электромеханическое, механическое, электроинформационное и механико-информационное	УКУ, силовой преобразователь, двигатель, механическое устройство, датчики и устройства обратной связи	<i>I0...I8</i>

В корпусе модуля движения объединены исполнительный двигатель и механическое устройство, причем вал двигателя является элементом механического преобразователя движения. Модули движения реализуют электромеханическое и механическое функциональные преобразования; их проектирование основано на исключении интерфейса *I4*.

Примерами модулей движения могут служить: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель и мотор-барабан. В состав современных модулей движения помимо двигателей и преобразователей движения входят и другие виды механических устройств – тормозные и люфтовыбирающие механизмы, направляющие и преобразователи движения. Так, мехатронный модуль фирмы Dunkermotoren на базе асинхронного двигателя (см. рис. 1.32) содержит дополнительно тормозное устройство. НТЦ «Редуктор» (Санкт-Петербург) производит мотор-редукторы с планетарно-фрикционными вариаторами скорости. К модулям движения можно отнести также высокооборотные мотор-шпиндели, которые получены объединением ротора электродвигателя и вала установки.

Мехатронные модули движения являются многофункциональными изделиями, которые выполняют электромеханическое, механи-

ческое и механико-информационное преобразования (табл. 4.4). В едином корпусе модуля находятся: двигатель, механическое устройство и датчик обратной связи. Точками структурно-конструктивной интеграции этих элементов являются интерфейсы *I4* и *I7*.

Главной особенностью современного этапа развития мехатроники является создание принципиально нового поколения модулей – интеллектуальных мехатронных модулей. По сравнению с мехатронными модулями движения в их конструкцию дополнительно встраиваются компьютерные устройства и силовые электронные преобразователи, что придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличительным признаком.

Интеллектуальные мехатронные модули реализуют все семь функциональных преобразований, представленных на рис. 4.7. В этих модулях структурно-конструктивная интеграция осуществляется по всем интерфейсным точкам *I0-I8*.

В общем случае интеллектуальный мехатронный модуль состоит из следующих основных элементов:

- электро- (или, например, гидро-) двигатель;
- механическое устройство;
- датчики и устройства обратной связи;
- устройство компьютерного управления;
- электронный силовой преобразователь;
- интерфейс *I0* для связи с компьютером верхнего уровня управления, а также внутренние интерфейсы (*I1 – I8*).

Основными преимуществами применения интеллектуальных мехатронных модулей являются:

- способность выполнять сложные движения самостоятельно, без обращения к верхнему уровню управления, что повышает автономность модулей, гибкость и живучесть мехатронных систем;
- упрощение коммуникаций между модулями и центральным устройством управления (например, с использованием беспроводных коммуникаций), что позволяет добиваться повышенной помехозащищенности мехатронной системы и ее способности к быстрой реконфигурации;
- повышение надежности и безопасности мехатронных систем благодаря компьютерной диагностике неисправностей и автоматической защите в аварийных и нештатных режимах работы;
- создание распределенных систем управления с применением компьютерных и сетевых технологий;

– использование современных методов управления (программных, адаптивных, интеллектуальных, оптимальных) непосредственно на исполнительном уровне для повышения качества процессов управления в конкретных реализациях;

– интеллектуализация силовых преобразователей для защиты модуля в аварийных режимах и диагностики неисправностей;

– интеллектуализация сенсоров для мехатронных модулей 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.

Встраивание интеллектуальных устройств непосредственно в мехатронный модуль порождает и ряд ограничений. К ним следует отнести сложность модернизации, увеличение массогабаритных показателей модуля движения по сравнению с приводами, где управляющие и электронные устройства расположены отдельно.

На рис. 4.9 представлен интеллектуальный мехатронный модуль, на примере модуля «Simodrive Posmo SI» фирмы Siemens. Отличительной чертой этого модуля является то, что силовой преобразователь и управляющее устройство конструктивно объединены с двигателем. С помощью штекерной техники осуществляется подключение цифровых входов и диагностических сигналов, а также электрическая связь между двигателем и силовым преобразователем. Связь с центральным устройством управления и другими модулями организуется через стандартную шину «PROFIBUS».



Рис. 4.9. Мехатронный модуль фирмы Siemens

#### **4.4 Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства**

На этапе проектирования осуществляется распределение функций между структурными элементами мехатронной системы. Современная тенденция при построении машин заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) компонентам, относительно дешевым и легко перепрограммируемым под новую задачу. Использование данного метода интеграции позволяет минимизировать механическую сложность мехатронной системы.

На рис. 4.10 представлен график показывающий динамику этого процесса в производственных машинах за последние десятилетия. Анализ показывает, что еще в начале 90-х годов XX века подавляющее большинство функций машины (более 70%) реализовывалось механическим путем. Однако современные механические устройства все чаще становятся узким местом в сложных машинах. Это объясняется их недостаточной функциональной гибкостью, наличием трения, люфтов и упругостей в передачах, относительно высокой стоимостью изготовления.

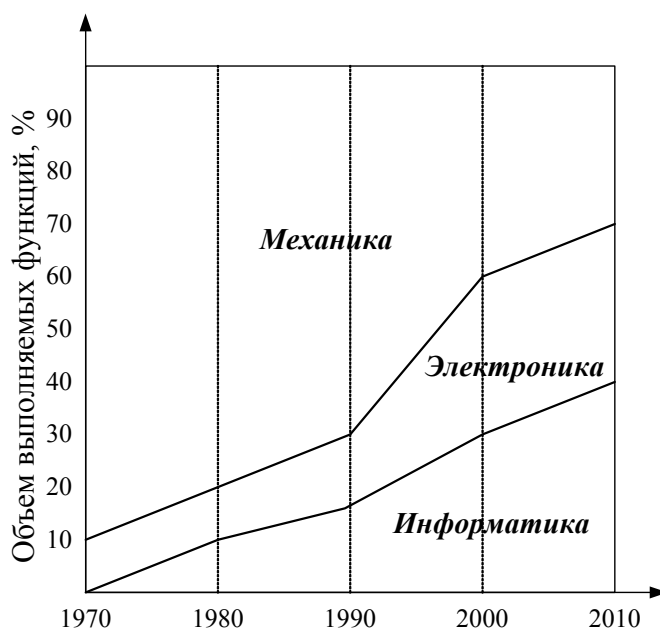


Рис. 4.10. Распределение функциональной нагрузки в производственных машинах

Поэтому в последующие десятилетия происходило постепенное вытеснение механических узлов сначала электронными, а затем и компьютерными блоками. В мехатронных системах упрощаются

механические решения, но используются сложные интеллектуальные системы управления. В настоящее время объем функций (а соответственно и стоимость) распределен между механическими, электронными и компьютерными компонентами практически равномерно. При этом доля компьютерной части возрастает, и есть все основания прогнозировать сохранение этой тенденции на будущее.

Мехатронный подход предполагает не дополнение, а замещение функций, традиционно выполняемых механическими элементами системы, электронными и компьютерными блоками. Если одна и та же функция может быть реализована устройствами различной физической природы, то при разработке системы необходимо учитывать технологические и организационно-экономические критерии.

Метод электронной редукции, является примером, когда управляемый исполнительный механизм отслеживает движение задающего устройства (рис. 4.11). Этот метод является аналогом способа копирующего управления, широко используемого для дистанционно управляемых роботов и манипуляторов.

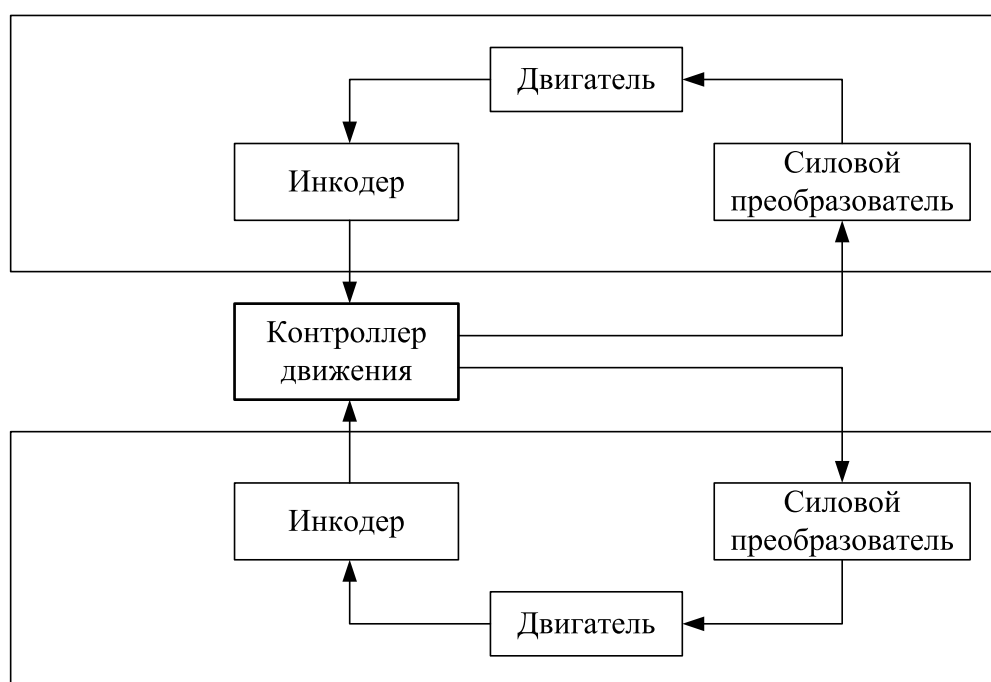


Рис. 4.11. Система управления движением на основе метода электронной редукции

Для количественного анализа и оценки мехатронных модулей и систем вводят специальную меру – показатель распределения функциональной нагрузки. Этот показатель позволяет оценить объем функциональной нагрузки, которую несет каждый из структурных

элементов или блоков в исследуемой системе. Чем выше значение данного показателя, тем большее влияние оказывает данный элемент на качество системы в целом, т. е. ее стоимость, надежность и другие комплексные характеристики. Показатель распределения функциональной нагрузки определяет важность структурной единицы (элемента, группы элементов, подсистемы) на основе наличия и числа ее связей с другими элементами системы. Чем выше ранг данного узла, тем большую функциональную нагрузку он несет, и тем существеннее влияет на качество системы в целом.

Этот показатель рассчитывается по алгоритму вычисления рангов структурных элементов и анализу распределения функциональной нагрузки внутри системы, разработанному на основе теории графов и матриц.

В работах Ю.В. Подураева методика расчета показателя распределенной функциональной нагрузки рассматривалась на примере трех вариантов системы управления робота «PUMA» (результаты расчета приведены в табл. 4.5). Структура исследуемой системы включала в себя как управляющую подсистему, так и электромеханическую часть (электродвигатель и фотоимпульсные датчики обратной связи), неизменной при выполнении анализа.

В табл. 4.5 приведены средние значения показателя распределенной функциональной нагрузки для группы элементов, содержащих компьютерные и электронные компоненты.

*Таблица 4.5*

Распределение функциональной нагрузки между элементами компьютерной и электронной группы

Структурные варианты подсистемы управления	Средний показатель распр. функц. нагрузки, %
Традиционная структура (первый уровень интеграции)	7,6
Структура второго уровня интеграции	12,4
Структура третьего уровня интеграции	21,3

Из табл. 4.5, следует что рассматриваемый показатель для структуры третьего уровня интеграции (с подсистемой управления на основе контроллеров движения) почти в 3 раза выше, чем в случае традиционного варианта.

Таким образом, оценка функционально-структурной интеграции и показатель распределения функциональной нагрузки – в совокупности позволяют на этапе проектирования оценивать уровень



структурных решений. Эти показатели не учитывают всех особенностей мехатронной системы, но дают возможность анализировать общесистемные структурные характеристики

### ***Вопросы для самопроверки***

**?**

1. Перечислите интеграционные задачи, решаемые при конструировании мехатронных устройств.
2. Опишите особенности иерархии уровней интеграции в мехатронных системах.
3. Дайте определение понятия «интерфейс».
4. Перечислите основные интерфейсы, которые присутствуют в обобщенной структуре мехатронных машин.
5. Приведите основные направления теории системного проектирования мехатронных систем.
6. Опишите суть функционально-структурного подхода.
7. Опишите суть структурного синтеза и оптимизации технических систем по критериям сложности.
8. Суть методологии параллельного проектирования.
9. Опишите обобщенную процедуру проектирования интегрированных мехатронных модулей и машин.
10. Перечислите и кратко опишите методы интеграции при проектировании интегрированных мехатронных модулей.
11. Какие основные особенности имеет метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов?
12. Опишите промежуточные преобразователи, применяемые в мехатронных модулях.
13. Представьте структурную модель мехатронного модуля.
14. Суть метода объединения элементов мехатронного модуля.
15. Из каких элементов в общем случае состоит интеллектуальный мехатронный модуль?
16. Какие основные преимущества создает применение интеллектуальных мехатронных модулей?
17. Какие основные особенности имеет метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства?
18. Какова сущность показателя распределения функциональной нагрузки в производственных машинах и тенденции его изменения в процессе развития мехатроники?

## Список литературы к разделу 4



1. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
2. Балашов Е.П. Проектирование информационно-управляющих систем / Е.П. Балашов, Д.В. Пузанков. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. В.С. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.
4. Егоров О.Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
5. Илюхин Ю.В. Совершенствование систем управления механообрабатывающих технологических роботов на основе концепций мехатроники / Ю.В. Илюхин // Мехатроника. – М., 2001. – №2. – С. 7–25.
6. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 216 с.
7. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление; пер. с англ. / Дж Николис, предисл. Б. Б. Кадомцева. – М.: Мир, 1989. – 488 с.
8. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов / Ю.В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
9. Юревич Е.И. Мехатроника как одна из концептуальных основ интеллектуальной техники нового поколения / Е.И. Юревич // Труды I Всероссийской НТК «Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 20–23.
10. Asada H. Dynamic Analysis and Computer-Aided Design of Robot Manipulators / H. Asada // Proc. IF AC 9-th World Congress. – Budapest, 1984. – P. 557–562.
11. Astanin V. Hexamech-1 Machining Centre for Aerospace Industry / V. Astanin, J. Bogachev, A. Duyunov, G. Smotrisky // Proc. of the 4-th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, April 20-21, 2004. – P. 15–24.
12. Bishop Robert H. The Mechatronics Handbook. Texas: The University of Texas. – CRC Press LLC, 2002. – 1229 p.

### ***5.1 Систематика мехатронных модулей***

Целью любой классификации является систематизация информации о некотором объекте в виде упорядоченной структуры для выполнения задач объективного (обеспечение полноты информации) и сравнительного (обеспечение информацией для сравнения) представления объекта. Использование иерархической структуры позволяет упростить поиск интересующей информации об объекте. Это позволяет создать эффективные информационно-поисковые системы на базе компьютерных баз данных.

Классификация характеризуется объектом, признаками классификации и их последовательностью. Согласно классификации создаются образы объекта. Поэтому для одного и того же объекта в зависимости от выбранных признаков и их последовательности, можно построить разные варианты иерархического дерева, т.е. несколько различных классификаций. Выбор предпочтительной классификации осуществляется исходя из требований решения определенной задачи.

На рис. 5.1 представлена, одна из известных, классификаций мехатронных модулей по конструктивным признакам.

В данной классификации выделено 3 признака достаточно полно характеризующих конструкцию мехатронных модулей (уровень интеграции, число степеней подвижности и вид движений), а также комплекс признаков (технические характеристики), определяющий функциональные возможности модулей.

Классификация мехатронных модулей предусматривает по уровню интеграции: модули движения, мехатронные модули движения и интеллектуальные мехатронные модули. По числу степеней подвижности – 1, 2, 3, и  $> 3$ . По виду движений – поступательные и вращательные.

Комплекс признаков технических характеристик включает: развиваемую силу и крутящий момент; величину, быстродействие и точность рабочего хода (линейного и углового).

Рассмотрим мехатронные модули согласно представленной классификации.

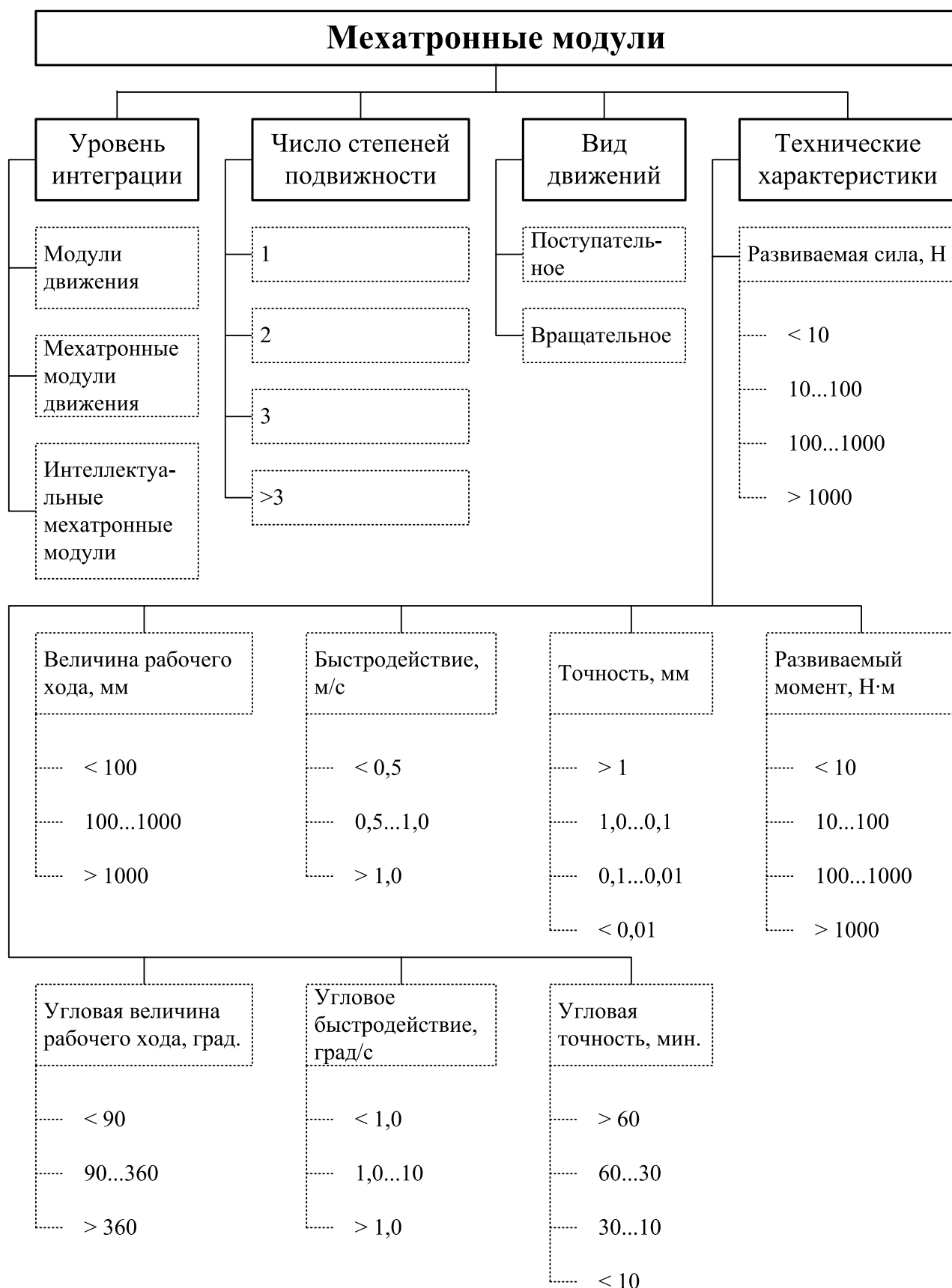


Рис. 5.1. Классификация мехатронных модулей

## **5.2 Преобразователи движения**

Передача движения от двигателя к выходному звену мехатронного модуля может быть обеспечена с помощью различных преобразователей движения (передач), структура и конструктивные особенности которых зависят от типа двигателя, вида перемещения выходного звена и их расположения (компоновки).

Преобразователи движения предназначены для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена. Для преобразования движения используют винтовые, реечные, цепные, тросовые передачи, а также передачи зубчатым ремнем, мальтийские механизмы и др. Так как электродвигатели в основном высокооборотные, а рабочие скорости выходных звеньев мехатронных модулей сравнительно невелики, то для согласования скоростей используют понижающие передачи (редукторы): зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные и волновые. Тип преобразователя движения выбирают, исходя из сложности его конструкции, коэффициента полезного действия, люфта в передаче, габаритных размеров и массы, свойств самоторможения, жесткости, удобства компоновки, технологичности, долговечности, стоимости и т. п. Выбор преобразователя движения оказывает существенное влияние на характеристики мехатронного модуля.

### **5.2.1 Реечные передачи**

Реечная передача предназначена для преобразования вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки и, наоборот, поступательного движения рейки во вращательное движение шестерни.

Основными звеньями реечной передачи являются шестерня и зубчатая рейка (рис. 5.2).

### **5.2.2 Планетарные передачи**

Планетарными называют передачи, содержащие зубчатые колеса, оси которых подвижны, как показано на рис. 5.3. Движение этих колес сходно с движением планет и поэтому их называют планетарными или сателлитами.

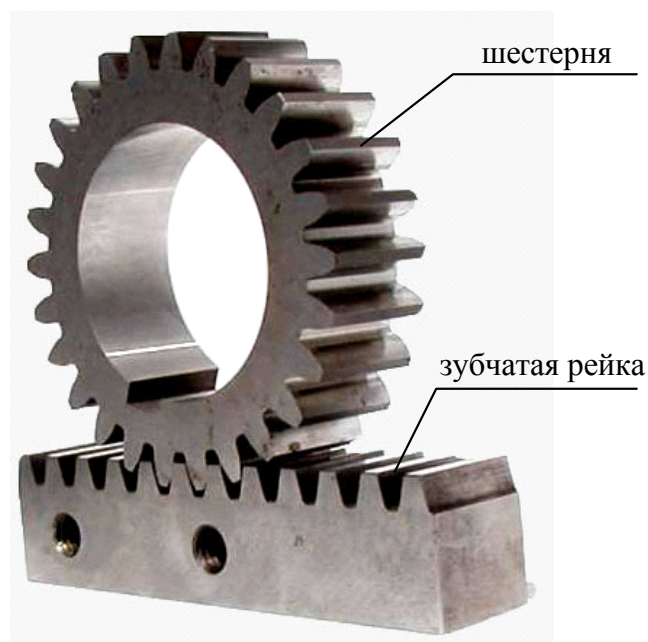


Рис. 5.2. Реечная передача

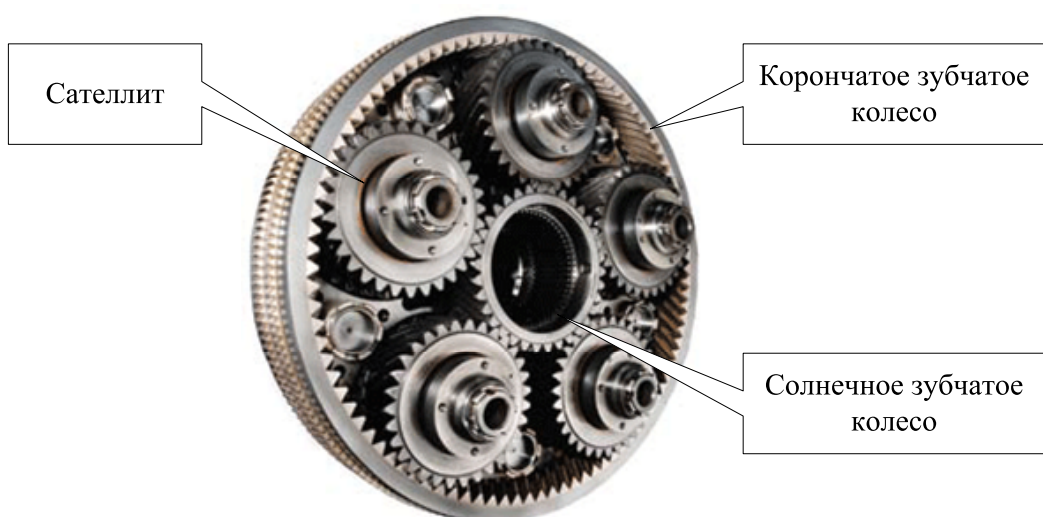


Рис. 5.3. Планетарная передача

Простейшая планетарная передача состоит из центрального солнечного зубчатого колеса с наружными зубьями, центрального корончатого зубчатого колеса с внутренними зубьями, сателлитов с внешними зубьями, которые входят в зацепление одновременно с солнечным и корончатым колесами, и водила, на котором расположены оси сателлитов (см. рис. 5.3).

В современных мехатронных модулях планетарные зубчатые передачи находят широкое применение благодаря их компактности и малой массе, реализации больших передаточных отношений, малой

нагрузки на опоры, большого коэффициента полезного действия, высокой кинематической точности, жесткости и надежности.

При проектировании планетарных зубчатых передач следует учитывать и их недостатки: конструктивную сложность, повышенные требования к точности изготовления и монтажа, снижение коэффициента полезного действия при увеличении передаточного отношения.

В зависимости от порядка наложения связей на звенья планетарные передачи могут использоваться как для суммирования нескольких вращательных движений, так и для их разделения между несколькими ведомыми валами.

### 5.2.3 Волновые зубчатые передачи

Работа волновой передачи основана на принципе преобразования параметров движения вследствие волнового деформирования одного из звеньев механизма. Этот принцип впервые был предложен в 1944 году А.И. Москвитиным для фрикционной передачи с электромагнитным генератором волн, а затем в 1969 г. В. Массером для зубчатой передачи с механическим генератором волн. С точки зрения кинематики она представляет собой планетарную передачу, у которой одно из колес выполнено в виде гибкого венца.

Волновая зубчатая передача состоит из гибкого зубчатого колеса с наружными зубьями, жесткого зубчатого колеса с внутренними зубьями и генератора волн (рис. 5.4).

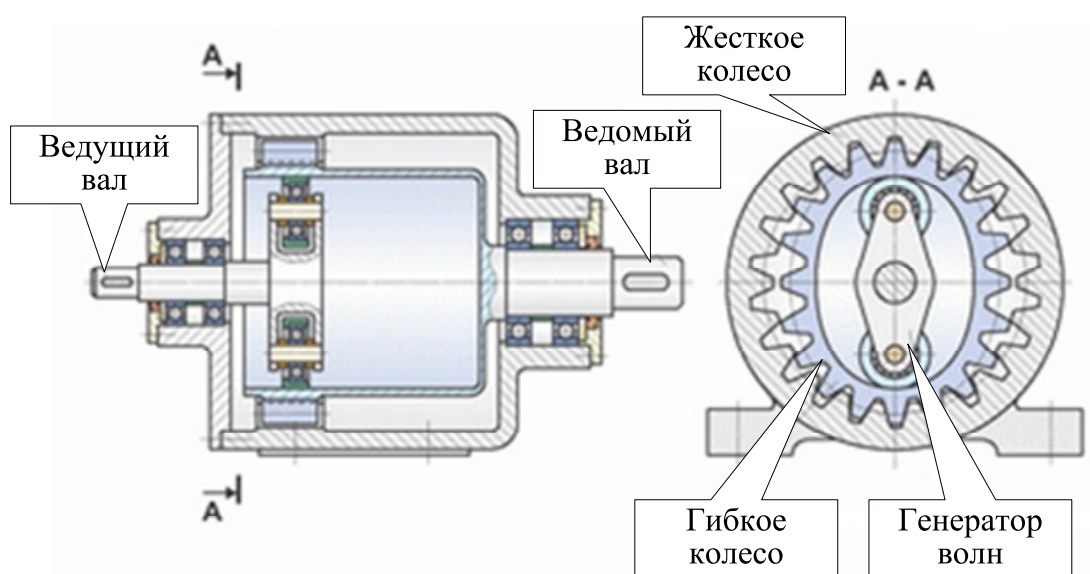


Рис. 5.4. Волновая зубчатая передача

Недостатками волновых передач являются: ограничение по частотам вращения ведущего вала генератора волн при больших диаметрах колес (во избежание высокой окружной скорости генератора), мелкие модули зубьев колес, меньшая крутильная жесткость гибкого колеса сравнительно с обычной зубчатой передачи.

Волновые передачи могут работать в качестве редуктора (КПД 80...90 %) и мультипликатора (КПД 60...70 %). В первом случае ведущим звеном является генератор волн, во втором – вал гибкого или жесткого колеса.

#### 5.2.4 Передача винт-гайка качения

Передача винт-гайка качения (шарико-винтовая передача) предназначена для преобразования вращательного в поступательное движение, и наоборот, поступательного во вращательное движение (при обеспечении отсутствия самоторможения).

Она характеризуется высоким КПД (0,9...0,95), малым коэффициентом трения-качения, небольшим износом, высокой точностью хода, долговечностью, возможностью полного устранения зазоров, высокой чувствительностью к микроперемещениям, возможностью работы без смазки.

Недостатками передачи являются: достаточно сложная технология изготовления, высокая стоимость, пониженное демпфирование и необходимость защиты от пыли.

В винтовых шариковых парах между рабочими винтовыми поверхностями винта и гайки (иногда вкладыша) помещены стальные шарики, как показано на рис. 5.5.

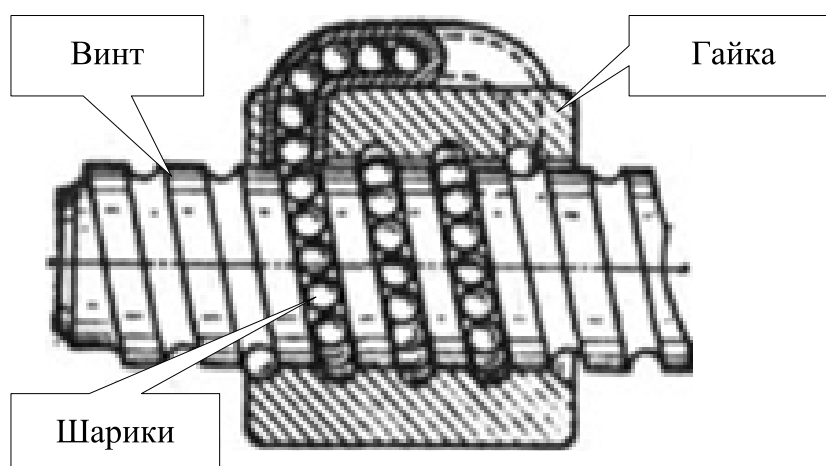


Рис. 5.5. Винтовая шариковая пара



Для обеспечения непрерывной циркуляции шариков концы рабочей части винтовой поверхности соединены возвратным каналом. Возвратный канал может представлять собой отверстие, просверленное в теле гайки и соединяющее начало первого витка с концом последнего витка резьбы (см. рис. 5.5), изогнутую трубку, концы которой вставлены в отверстия гайки, просверленные по касательной к поверхности резьбы, специальный вкладыш, который направляет шарики из впадин одного витка через выступ резьбы винта во впадину соседнего витка. Вкладыш вставляют в окно гайки. В большинстве случаев в гайке применяют 3, 4 или 6 окон, расположенных соответственно под углом 120, 90 или 60 градусов.

#### *5.2.5 Передача винт-гайка скольжения*

Передача винт-гайка скольжения служит для преобразования вращательного в поступательное движение, а иногда и для преобразования поступательного во вращательное движение (при использовании многозаходной винтовой пары).

Передача состоит из винта и гайки, как показано на рис. 5.6.

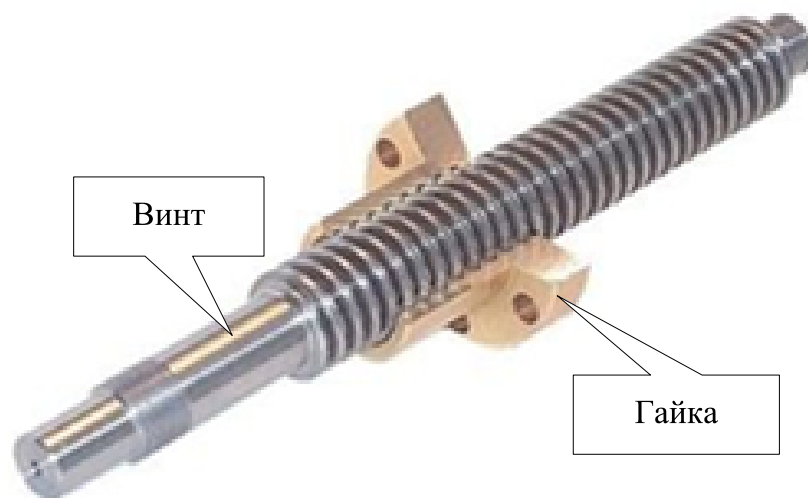


Рис. 5.6. Передача винт-гайка скольжения

Передача обладает простотой конструкции и изготовления, компактностью при высокой нагрузочной способности, высокой надежностью, плавностью и бесшумностью, возможностью обеспечения перемещений с большой точностью и выигрышем в силе.

Недостатками передачи являются: обязательное наличие зазоров (люфтов), повышенный износ резьбы и низкий КПД из-за большого коэффициента трения-скольжения.

### 5.2.6 Дифференциальная и интегральная передачи винт-гайка

Дифференциальная передача винт-гайка состоит из винта, имеющего два резьбовых участка с резьбами имеющими разный ход ( $P_{h1} \neq P_{h2}$ ) и одного направления винтовой линии (правого или левого), гайки и стойки, как показано на рис. 5.7 ( $P_{h1} < P_{h2}$ ).

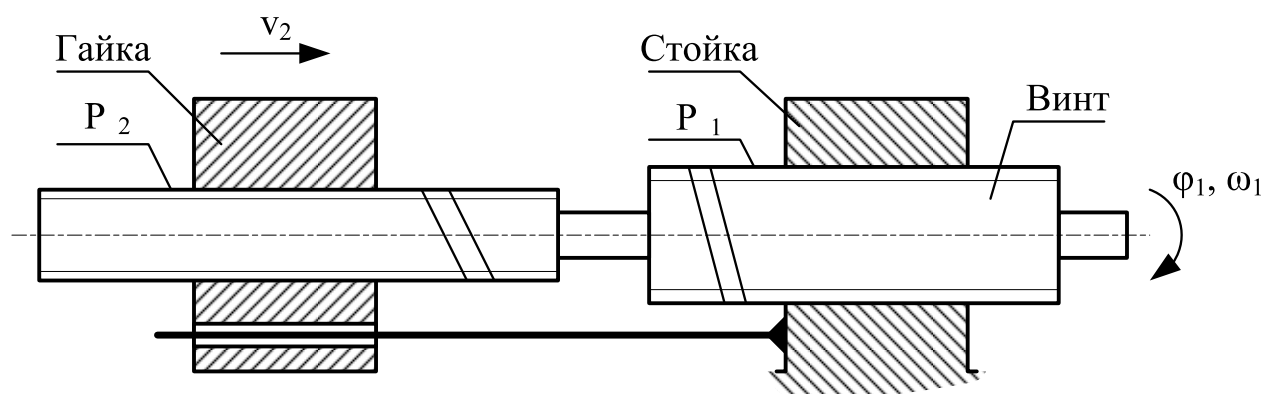


Рис. 5.7. Дифференциальная передача винт-гайка

При вращении винта гайка совершает поступательное результирующее движение: переносное движение вместе с винтом относительно стойки и движение относительно винта (см. рис. 5.7). Направление и величина перемещений гайки зависит от соотношения ходов резьб  $P_{h1}$ ,  $P_{h2}$  (у однозаходной резьбы шаг  $P$  и ход  $P_h$  одинаковы, а у многозаходной  $P_h = n \cdot P$ , где  $n$  – число заходов резьбы).

Дифференциальная передача винт-гайка позволяет получить: при преобразовании вращательного движения в поступательное – малые линейные перемещения и скорости гайки при больших угловых перемещениях и скоростях винта, при преобразовании поступательного движения во вращательное – большие угловые перемещения и скорости винта при малых перемещениях и скоростях гайки (имеет место ограничение по углу самоторможения).

Шаг  $P_{h2}$  резьбы винта и гайки и прочие параметры передачи определяют аналогично винтовым передачам скольжения и качения.

Интегральная передача винт-гайка устроена аналогично дифференциальной передаче, но имеет противоположные направления винтовой линии на двух резьбовых участках винта.

### 5.2.7 Передачи с гибкой связью

Передачи с гибкой связью предназначены для передачи вращательного движения и преобразования поступательного во вращательное движение и наоборот вращательного в поступательное движение.

К передачам с гибкой связью относят ременную, цепную, тросовую передачи и передачу стальной лентой.

Некоторые примеры передач вращательного движения представлены на рис. 5.8.

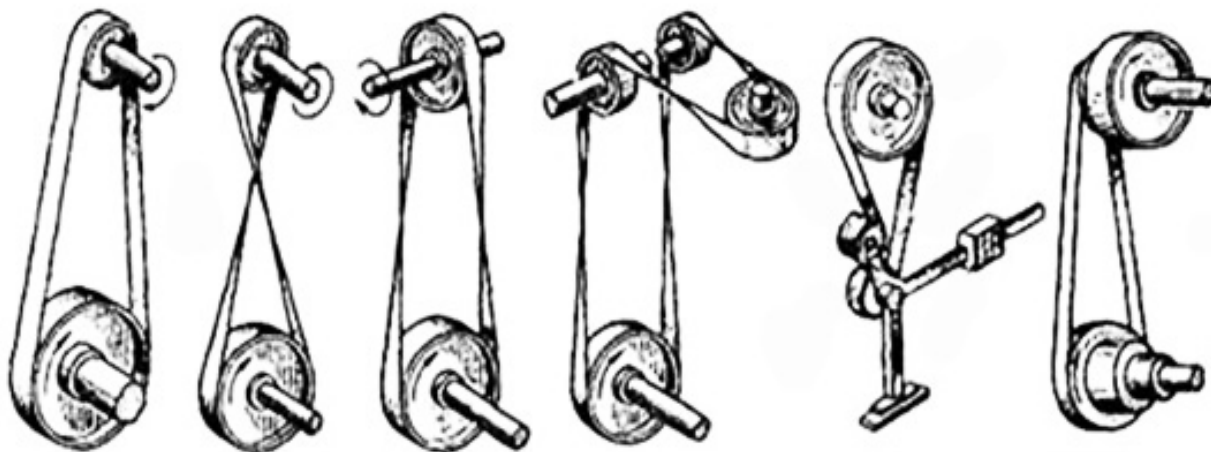


Рис. 5.8. Передачи с гибкой связью

## 5.3 Направляющие

Направляющими называют конструктивные элементы устройства, обеспечивающие заданное относительное движение элементов механизма.

В мехатронных модулях в основном применяют направляющие для поступательного движения. Их используют при необходимости осуществления перемещения одной детали относительно другой с заданной точностью.

К направляющим предъявляют следующие требования: обеспечение плавности перемещения, малые силы трения, большой ресурс работы, износостойкость, способность к перемещению в широком температурном диапазоне.

В зависимости от вида трения различают направляющие с трением скольжения и качения. Выбор типа направляющих и

конструктивных схем зависит от их назначения, а также от требований к точности направления перемещения, допускаемой нагрузки, значений сил трения, стоимости изготовления.

Направляющие с трением скольжения и качения по характеру (виду) воспринимаемой нагрузки различают открытые и закрытые. К открытым относят направляющие, у которых для замыкания силовой цепи используют дополнительные прижимные усилия (масса подвижной детали, усилие плоской или спиральной пружины, мембраны). Закрытыми являются направляющие, у которых подвижный узел имеет одну степень свободы (замыкание силовой цепи обеспечивается конструктивным исполнением).

Направляющие в зависимости от формы выполнения рабочих поверхностей делят на цилиндрические, призматические (например, типа «ласточкин хвост»), Н-, П- и Т-образные.

### 5.3.1 Направляющие с трением скольжения

По конструктивному исполнению направляющие с трением скольжения проще направляющих с трением качения и меньше их по габаритным размерам. При соответствующем выборе материалов они испытывают незначительное влияние температурных перепадов. Основной их недостаток – относительно большие потери на трение.

Пример, конструктивной схемы призматической открытой направляющей с трением скольжения приведен на рис. 5.9 б, где по цилиндрическим направляющим, закрепленным на неподвижном основании, перемещается каретка с призматическими рабочими поверхностями.

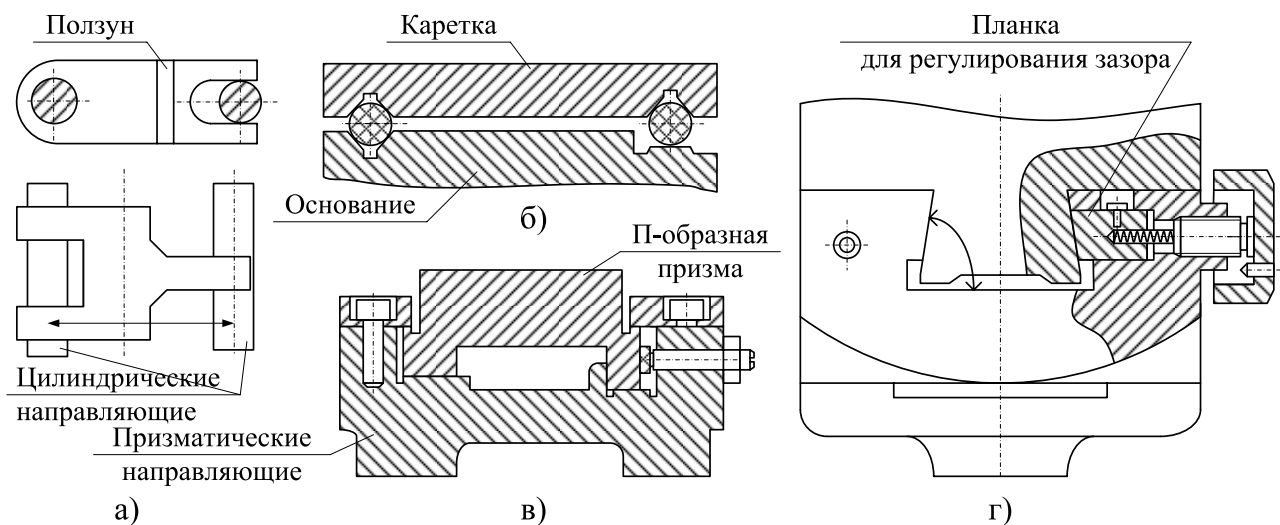


Рис. 5.9. Направляющие с трением скольжения

Схемы направляющих закрытого типа приведены на рис. 5.9 а, в, г. На схеме (рис. 5.9 а) по цилиндрическим направляющим перемещается ползун с цилиндрической и плоской рабочими поверхностями; по прямоугольным призматическим направляющим (рис. 5.9 в) перемещается П-образная призма; по призматическим направляющим типа «ласточкин хвост» с углом профиля  $\alpha = 45 \div 60^\circ$  перемещается призма. Для призматических направляющих типа «ласточкин хвост» предъявляются повышенные требования к точности сборки и регулировки для предотвращения перекоса деталей и соответственно возможного заедания направляющих.

В призматических направляющих применяют призмы трапецеидального, прямоугольного или треугольного сечения. Регулировку зазоров в направляющих производят с помощью планок или «сухариков» (см. рис. 5.9 г).

### *5.3.2 Направляющие с трением качения*

Направляющие с трением качения применяют в тех случаях, когда требуется обеспечить легкость и плавность движения. По сравнению с направляющими трения скольжения эти направляющие имеют меньшие потери на трение, более долговечны, малочувствительны к перепадам температуры.

Направляющие с трением качения по форме тел качения делят на шариковые и роликовые (цилиндрические и конические). Для удержания шариков или роликов на определенном расстоянии друг от друга применяют сепараторы, изготовленные из латуни или текстолита. Возможно применение стандартных шариковых или роликовых подшипников.

Существенными факторами, оказывающими отрицательное влияние на работу направляющих с трением качения, являются зазоры между сопряженными с телами качения поверхностями каретки и основания. В открытых направляющих зазоры выбираются автоматически (саморегулируются), а в закрытых требуется их регулировка.

На рис. 5.10 приведена конструктивная схема закрытой шариковой направляющей с сепараторами, в которой регулировку зазора между шариками и кареткой проводят при помощи перемещения одной или двух планок с последующим их закреплением винтами.

В роликовых направляющих (см. рис. 5.10, 5.11) основной деталью является ролик, который перекатывается по цилиндрической

или плоской поверхности. В качестве роликов иногда используют стандартные радиальные подшипники.

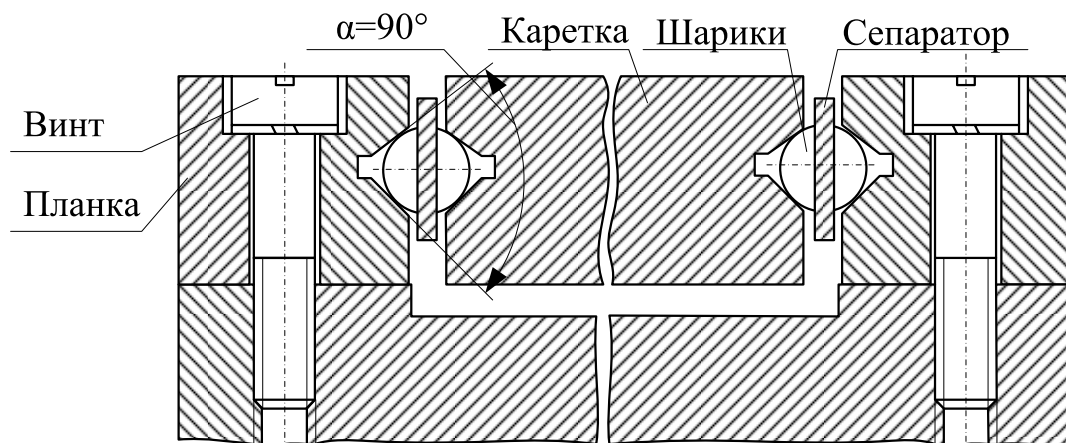


Рис. 5.10. Направляющие с трением качения закрытого типа

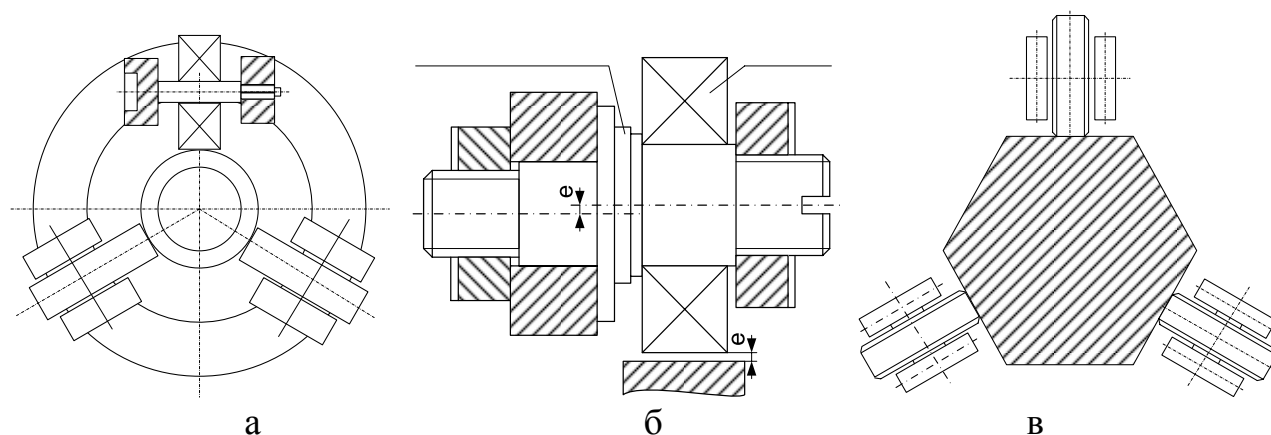


Рис. 5.11. Направляющие с трением качения открытого типа

Для обеспечения контакта всех роликов с направляющими должна быть предусмотрена специальная регулировка, один из вариантов которой показан на рис. 5.11 б. Ролик устанавливается на оси с эксцентриситетом  $e$ .

Для направляющих, представленных на рис. 5.11 в ролики с эксцентричными осями необязательны, так как каждый ролик закреплен в отдельной державке. Регулирование осуществляют перемещением державок.

На рис. 5.12 а, б, в приведены конструктивные схемы роликовых направляющих закрытого типа.

В последнее время применяют более экономичные шариковые направляющие линейного перемещения, которые уменьшают габ-

ритные размеры конструкции, массу и общую стоимость мехатронного модуля.

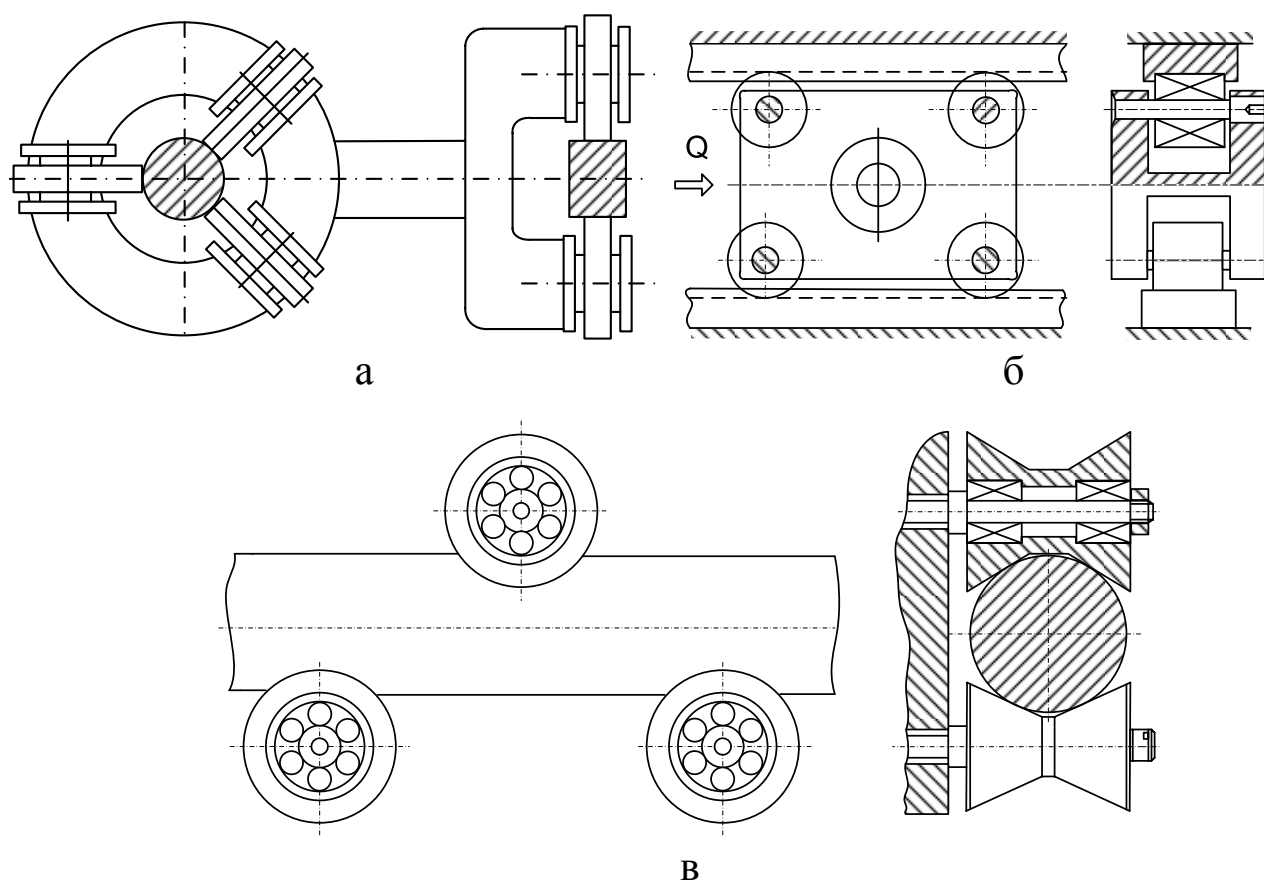


Рис. 5.12. Роликовые направляющие закрытого типа

#### **5.4 Тормозные устройства и механизмы для выборки люфтов**

Тормозными называют устройства, которыми снабжают мехатронные модули, для уменьшения скорости подвижного звена, остановки и фиксации его в определенной позиции.

В зависимости от природы сил торможения тормозные устройства делят на механические, гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные. Механические тормозные устройства – пружинные, резиновые, эластомерные, инерционные и фрикционные. Гидравлические – устройства дроссельного регулирования. Пневматические – могут быть напорными и вакуумными. К электрическим относят электромагнитные, индукционные и гистерезисные, а также порошковые тормозные устройства с сухим и жидким наполнителем фрикционного и дроссельного типов. Комбини-

рованные – включают в себя два или более типов устройств (например, пневмогидравлические или пружинно-пневматические).

Ко всем типам тормозных устройств предъявляют следующие основные требования: обеспечение заданного закона торможения; безударный останов и фиксация подвижных элементов в точках позиционирования; высокая надежность и долговечность конструкции; высокое быстродействие; простота и компактность конструкции; стабильность характеристик при изменении условий работы; малая чувствительность к изменению температуры, влажности, тормозимой массы, скорости; возможность настройки и доступность регулирования; удобство осмотра и обслуживания; низкая стоимость, минимальные габариты и масса.

#### *5.4.1 Механические тормозные устройства*

В механических тормозных устройствах силу сопротивления движению подвижного звена создают деформацией рабочих элементов (упругие) или трением (фрикционные). В качестве упругих элементов наиболее часто применяют цилиндрические пружины сжатия, реже – растяжения. Распространение получили резиновые и резинометаллические упругие элементы различной конфигурации, а также пенополиуретановые упругие элементы.

Основными рабочими элементами фрикционных тормозных устройств являются пары трения вращательного или поступательного типов.

Примерами простейших тормозных устройств могут служить одна или несколько цилиндрических пружин, которые устанавливают непосредственно между функциональным звеном и упорами параллельно оси его движения либо оформляют в виде отдельного конструктивного узла.

Цилиндрические пружины допускают большие деформации, сохраняют свои характеристики под воздействием продолжительной статической нагрузки, выдерживают значительные температурные воздействия, обладают малым демпфированием, но могут возникать трудности при регулировании (настройке) силовой характеристики, т. к. начальное поджатие приводит к возникновению скачка нагрузки на тормозимые массы.

Резиновые тормозные устройства состоят из последовательно установленных резиновых втулок, разделенных металлическими шайбами. По конструкции резиновые втулки могут работать на



сжатие или сдвиг. Втулки, работающие на сжатие, обладают небольшой податливостью, но значительной нагрузочной способностью, втулки сдвига – наоборот большой податливостью и сравнительно малой нагрузочной способностью.

Резинометаллические тормозные устройства обладают высокой надежностью, простой конструкцией и технологией изготовления, удобством обслуживания и большой энергоемкостью. Имеются недостатки – чувствительность к изменению температуры и влажности, наличие большой силы отдачи.

Фрикционные тормозные устройства используют для торможения, позиционирования и удержания (фиксации) функциональных звеньев. Они позволяют преобразовать большую часть кинетической энергии в тепловую, которая рассеивается в окружающей среде.

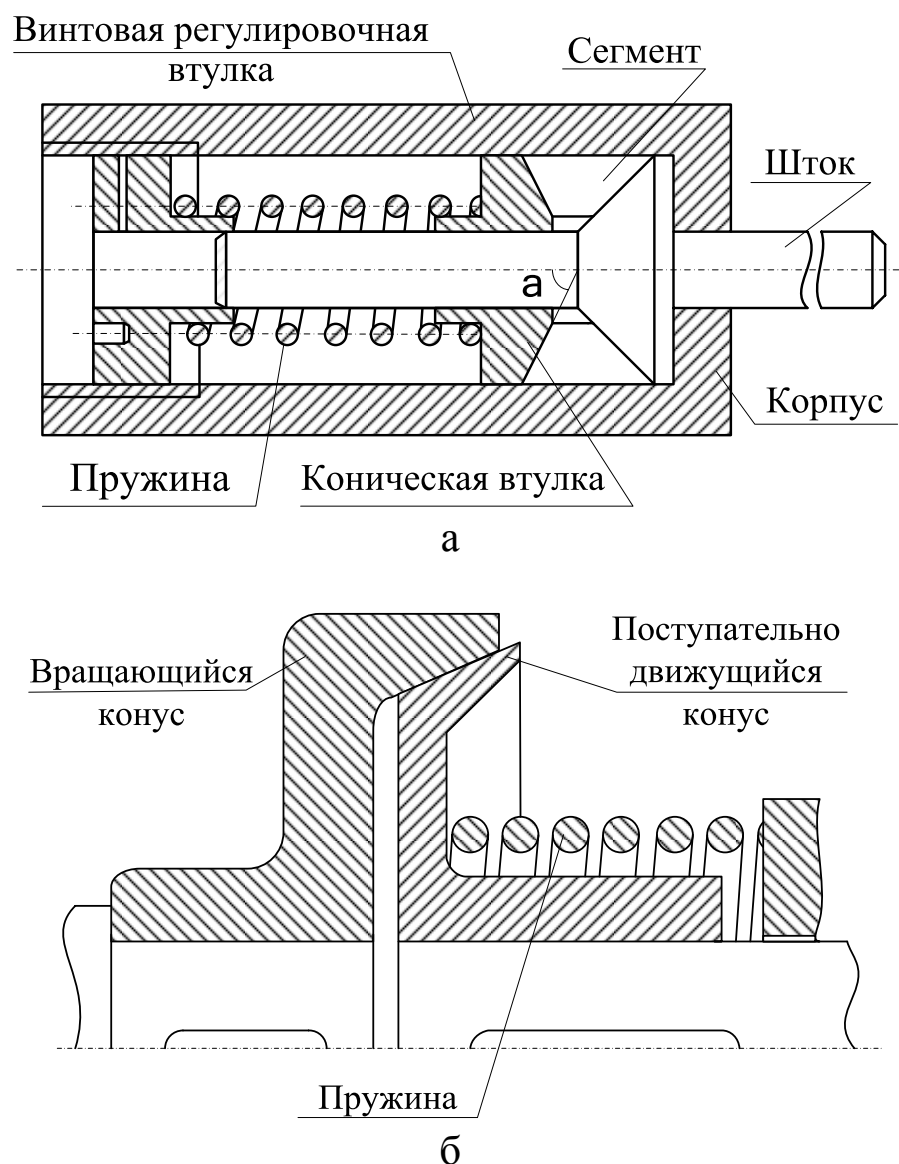
По конструкции фрикционные тормозные устройства делятся на автономные поступательного и вращательного движения, встроенные в пневмо- или гидродвигатель, управляемые и неуправляемые, нормально замкнутые и разомкнутые, одно- и двустороннего действия. Как правило, одно из звеньев фрикционной пары крепится к корпусу или другому узлу, относительно которого осуществляется торможение.

На рис. 5.13 представлены примеры фрикционных тормозных устройств. При перемещении штока с коническим буртиком сегменты скользят по внутренней цилиндрической поверхности корпуса прижимаясь к ней пружиной, расположенной между конической и винтовой регулировочной втулкой (рис. 5.13 *а*).

Фрикционный конусный тормоз (рис. 5.13 *б*) состоит из вращающегося конуса с рабочим звеном, поступательно движущегося конуса и пружины.

Фрикционные тормозные устройства характеризуются нестабильностью силы трения и ее зависимостью от качества и состояния поверхностей скольжения (шероховатости, наличия масла и др.) и скорости перемещения подвижных элементов, что приводит к изменению условий работы по сравнению с номинальными и отклонению реального закона торможения от заданного. Поэтому устройства этого типа целесообразно использовать для торможения механизмов с достаточно стабильными режимами работы.

Для создания тормозных устройств с программируемыми точками останова и регулирования скорости движения выходного звена используют встроенные фрикционные устройства.



а – упруго-фрикционный с цилиндрической пружиной и разрезной конической втулкой; б – фрикционный конусный тормоз

Рис. 5.13. Фрикционные тормозные устройства

#### 5.4.2 Электромагнитные тормозные устройства

В управляемых электромагнитных тормозных устройствах источником создания тормозящего момента или усилия является электромагнитное поле, воздействующее непосредственно на движущиеся элементы (электромагнитные, индукционные и гистерезисные тормоза) или косвенно через порошкообразный сухой или жидкий наполнитель (электромагнитные порошковые или с ферромагнитными жидкостями тормоза).

По принципу действия и устройству электромагнитные тормозные устройства индукционного и гистерезисного типов аналогичны электрическим двигателям, в которых ротор или статор неподвижен. Взаимодействие между подвижной и неподвижной частями тормоза осуществляется электромагнитным полем, создаваемым обмоткой управления (возбуждения).

По принципу действия электромагнитные тормозные устройства с порошковым и жидким наполнителями аналогичны соответственно фрикционным тормозам и гидравлическим тормозным устройствам дроссельного регулирования. Действие электромагнитного порошкового тормоза фрикционного типа основано на свойстве сухого или взвешенного в масле ферромагнитного порошка увеличивать в магнитном поле свою вязкость и прочно прилипать к поверхности магнитной системы.

#### *5.4.3 Механизмы для выборки люфтов*

Точность работы мехатронных модулей определяется допусками на размеры сопрягаемых деталей и величиной мертвого хода (холостого, т. е. не передаваемого на ведомое звено движения ведущего звена механизма, возникающее в момент реверсирования движения).

Мертвый ход приводит к ошибкам перемещения, поэтому его стремятся уменьшить или устранить. Этого можно достичь с помощью специальных регулировочных устройств-механизмов выборки мертвого хода (люфтовыбирающих механизмов).

В мехатронных модулях могут использовать механизмы выборки бокового зазора между зубьями колес зубчатых передач двух типов: автономные и с дополнительной кинематической цепью (замкнутым энергетическим потоком).

В автономных механизмах выборки мертвого хода используют метод раздвоения ведомого колеса, где в качестве силовых элементов используют пружины.

Кроме выборки мертвого хода при помощи пружин используют жесткую фиксацию, заключающуюся в предварительном относительном смещении половинок раздвоенного зубчатого колеса и их жестком закреплении при помощи винтов, болтов, клеммовых соединений и т. д. На рис. 5.14 представлена червячная передача с раздвоенным червячным колесом. Зубья половинок и червячного

колеса прижимают поворотом эксцентрика к разным сторонам зубьев червяка и их жестко фиксируют, затягивая болт.

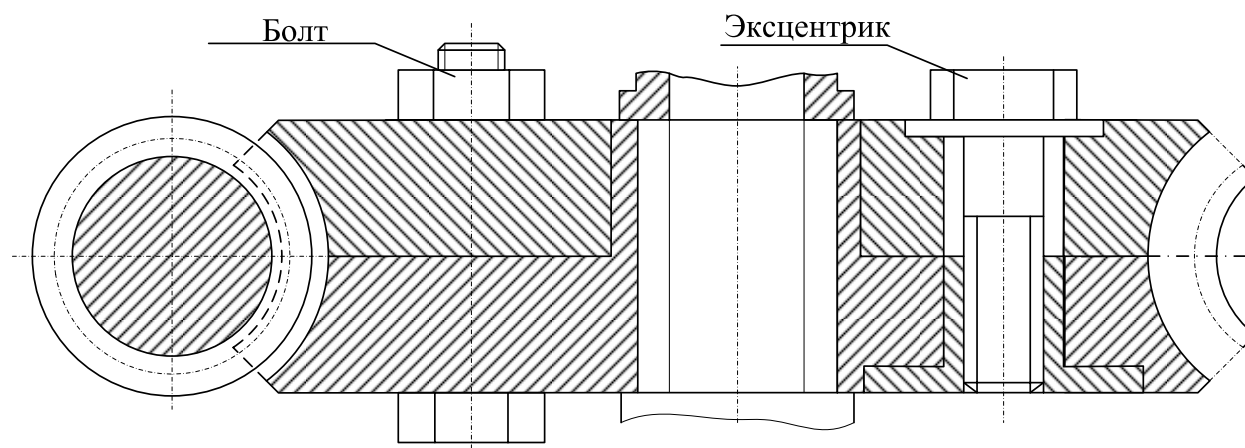


Рис. 5.14. Червячная передача с раздвоенным червячным колесом

Основными недостатками выборки мертвого хода методом раздвоения колеса являются: наличие большого числа дополнительных элементов (пружин, зубчатых колес, винтов и т. д.), увеличенные потери в зацеплении, обусловленные тем, что трение возникает с двух сторон зуба.

Указанные недостатки частично могут быть устранены в механизмах выборки мертвого хода с дополнительной кинематической цепью (безлюфтовые механизмы с замкнутым энергетическим потоком). Они позволяют осуществить полный выбор люфтов во всех составляющих звеньях путем принудительного разворота в противоположные стороны двух соосно расположенных элементов одной из передач. Как правило, для образования замкнутого контура к исходной кинематической цепи добавляют такую же параллельно расположенную кинематическую цепь.

Различают два способа выборки бокового зазора в винтовых механизмах – радиальное и осевое смещение гайки относительно винта. При радиальном способе осуществляют сжатие гайки в радиальном направлении, а при осевом – относительное смещение разрезной гайки в осевом направлении.

Радиальный способ устранения мертвого хода целесообразно применять для метрических резьб, т. е. для резьб с большим углом профиля, а осевой способ – для резьб с малым или нулевым углом профиля (трапецеидальные, упорные, прямоугольные).

Устройства, обеспечивающие выборку радиальной составляющей бокового зазора, представляют собой разрезные гайки. В этих устройствах две половинки гайки стягиваются винтами и обжимают винт. При этом создается неравномерное обжатие винта, что вызывает неравномерный износ резьбы гайки.

На рис. 5.15 а, в, г приведены механизмы для выборки радиальной составляющей бокового зазора, которые необходимо периодически регулировать, а в устройстве рис. 5.15 б, имеющем пружины, это не требуется.

Устройства с разрезной гайкой и цанговым зажимом обеспечивают более равномерное обжатие винта, что способствует выравниванию износа винтовой пары.

Выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляют путем относительного осевого смещения частей составной гайки.

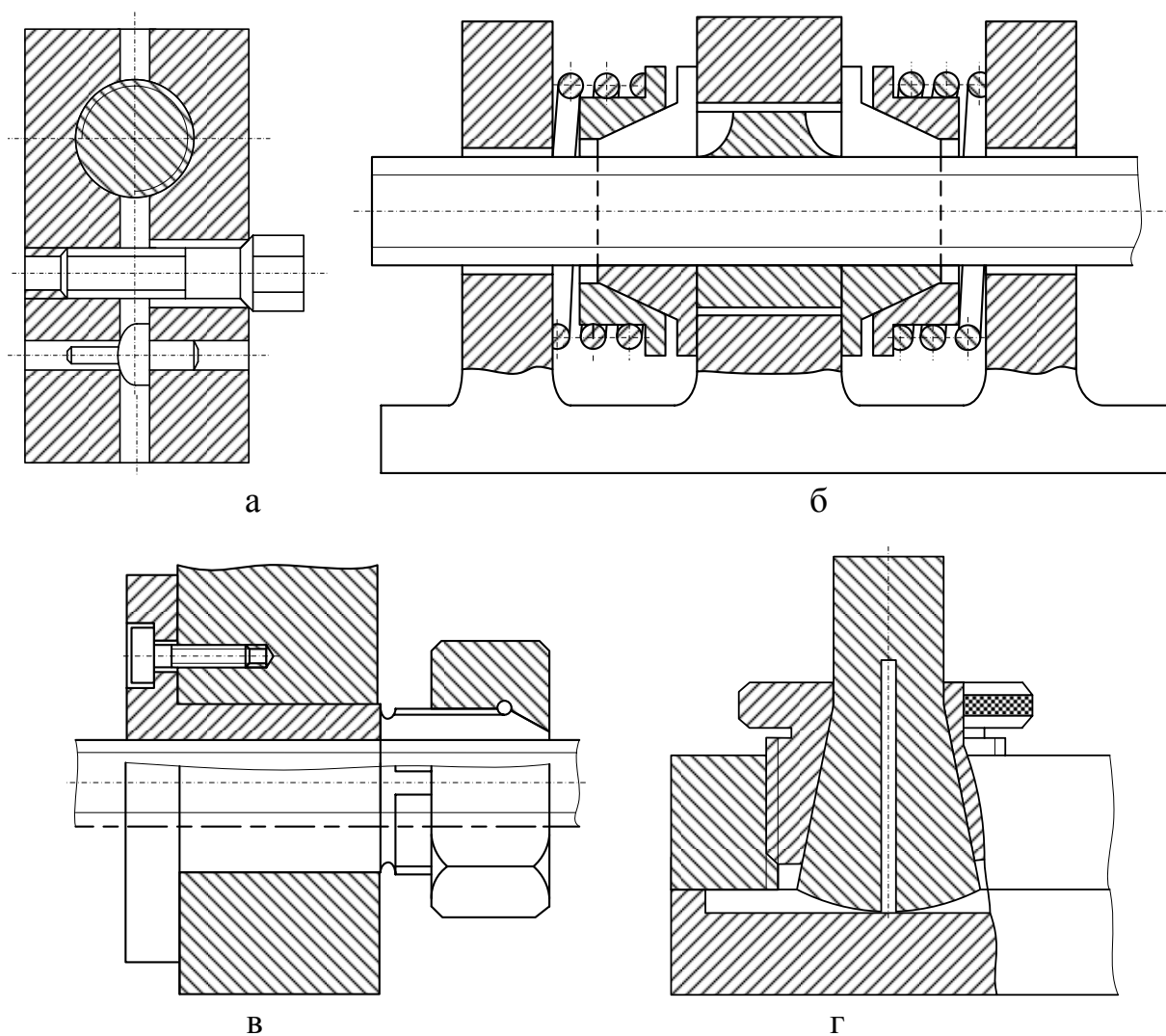


Рис. 5.15. Механизмы выборки радиальной составляющей бокового зазора винтовой передачи

На рис. 5.16 а показана схема люфтовывбирающего механизма на основе гайки с жесткой регулировкой осевого зазора (завинчиванием). Люфт выбирается одновременным контактом профилей резьб винта и профилей обеих гаек, как показано на рис. 5.16 в.

Люфтовывбирающий механизм на основе гайки с упругой регулировкой осевого зазора показан на рис. 5.16 б. Выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляет пружина, отжимая регулируемую гайку от базовой гайки, обеспечивая двухпрофильный контакт резьбы винта с резьбами гаек, как показано на рис. 5.16 г.

Механизмы выборки мертвого хода на основе гаек с жесткой и упругой регулировкой осевой составляющей бокового зазора обеспечивают высокую точность относительного перемещения винта и гайки при их движении как в прямом, так и в обратном направлениях.

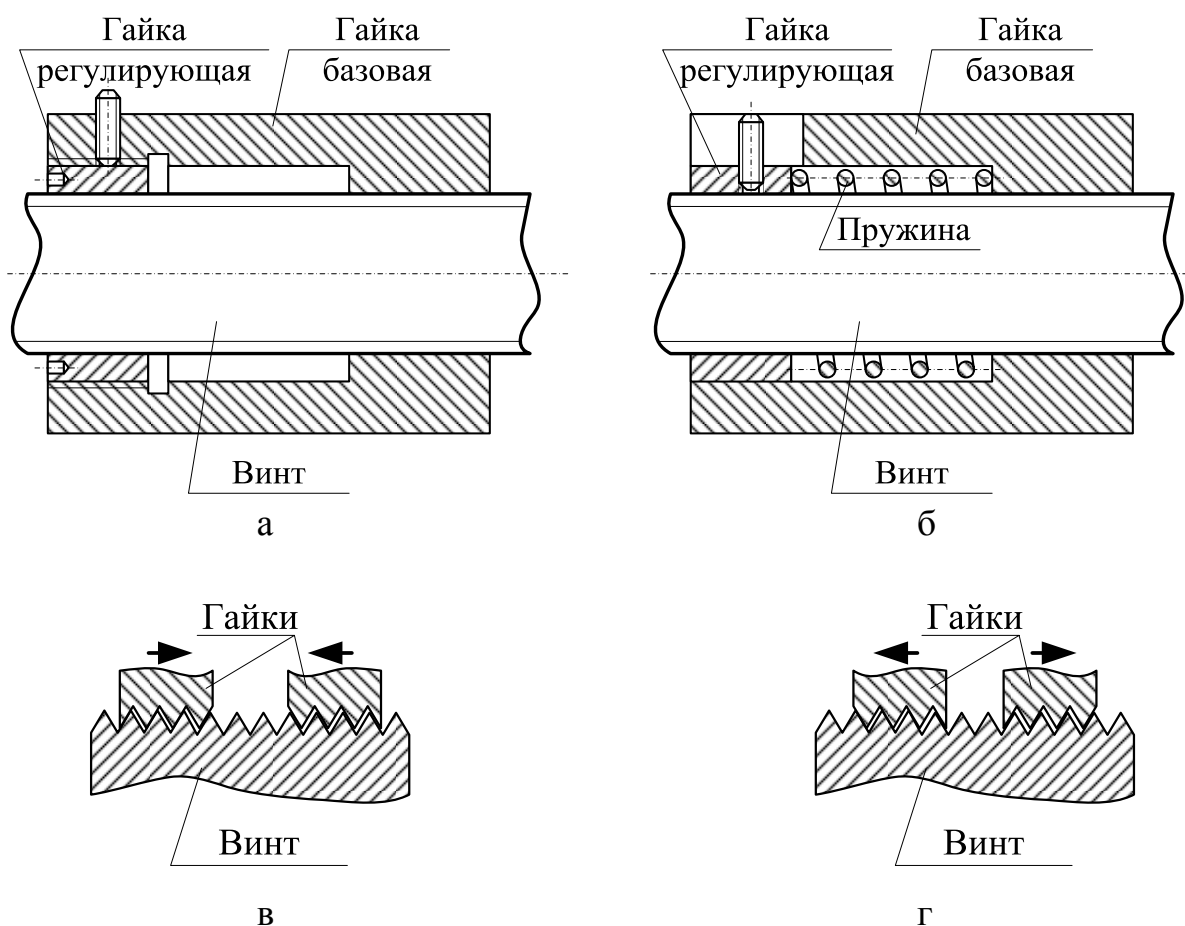


Рис. 5.16. Схема люфтовывбирающего механизма на основе гайки с жесткой и упругой регулировкой осевого зазора

## 5.5 Электродвигатели мехатронных модулей

Применение в мехатронных системах электродвигателей постоянного тока обусловлено такими их преимуществами как: линейность характеристик, широкий диапазон регулирования скорости, достаточная перегрузочная способность, равномерное вращение на низких скоростях.

В свою очередь двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, которые по принципу действия не отличаются от двигателей с электромагнитным возбуждением, позволяют получить более высокий КПД, меньшие весогабаритные показатели (в области малых мощностей), имеют облегченные условия охлаждения. Постоянный магнит изготавливают из магнитотвердых материалов, которые имеют широкую петлю гистерезиса. Для получения постоянных магнитов используют различные сплавы на основе железа, алюминия, цинка, кобальта и некоторых редкоземельных металлов. Наилучшими свойствами обладает сплав самария с кобальтом и празеодимом. Регулирование скорости двигателя осуществляется путем изменения якорного напряжения. Семейство механических характеристик для различных значений якорного напряжения представлено на рис. 5.17.

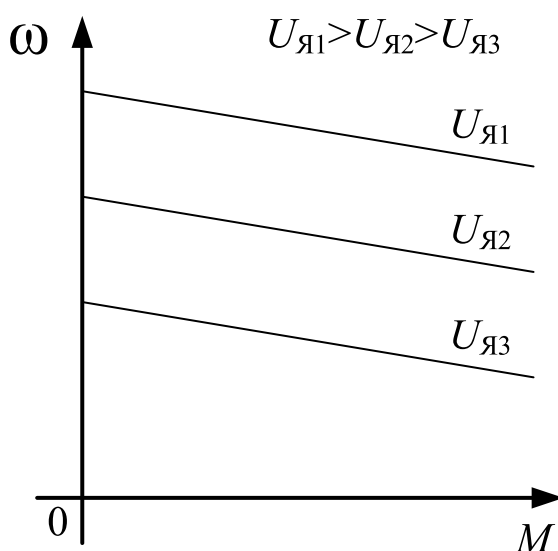


Рис. 5.17. Механические характеристики

Наличие в двигателях постоянного тока коллекторно-щеточного узла, снижающего надежность систем и увеличивающего затраты на обслуживание, привели к разработке вентильных двигателей.

Вентильный двигатель (ВД) содержит электронный коммутатор (К), который по своим функциям заменяет коллектор и щетки двигателя. На статоре вентильного двигателя располагается трехфазная обмотка переменного тока, питаемая через коммутатор. Ротор обеспечивает возбуждение двигателя с помощью постоянного магнита (мощности до 30 кВт).

Коммутатор по принципу действия представляет собой управляемый инвертор (УИ), который может питаться непосредственно от источника постоянного тока (аккумуляторная батарея, сеть постоянного тока) или от управляемого выпрямителя (УВ), если двигатель подключен к сети переменного тока. Во втором случае коммутатор представляет собой преобразователь частоты со звеном постоянного тока.

Управление коммутатором производится с помощью датчика положения ротора (ДП), устанавливаемого на валу двигателя. ДП формирует сигналы, поступающие на систему управления (СУ). В результате чего с помощью статорных обмоток создается вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с полем ротора и в результате возникает синхронизирующий момент. Функциональная схема включения ВД показана на рис. 5.18.

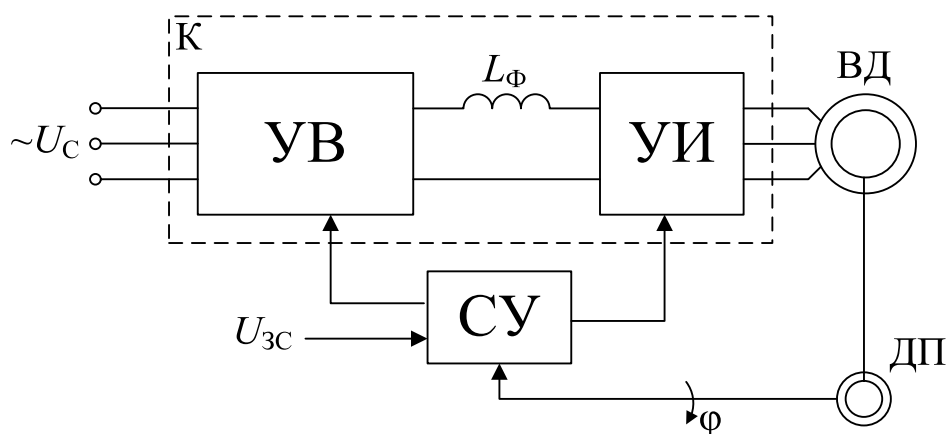


Рис. 5.18. Функциональная схема вентильного двигателя

Регулирование скорости вентильного двигателя производится путем изменения задающего сигнала  $U_{зс}$ , вследствие чего изменяется выходное напряжение УВ и частота тока УИ.

Вентильные двигатели по сравнению с коллекторными обладают рядом преимуществ: более высокая надежность и срок службы; улучшение тепловой характеристики из-за отсутствия тепло-



элементов в роторе; более высокое быстродействие за счет меньшего момента инерции ротора, большая перегрузочная способность. Такая электрическая машина с  $n$ -фазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита представляет собой по сути синхронный двигатель.

Известно, что разновидностью синхронного двигателя является шаговый двигатель, у которого питание статорных обмоток осуществляется путем подачи импульсов напряжения от источника постоянного тока с помощью электронного коммутатора. При этом ротор, выполненный в виде постоянного магнита, под воздействием каждого импульса совершает определенное угловое перемещение, называемое шагом.

Шаговые двигатели применяются в том случае, если управляющий сигнал задан в виде последовательности импульсов. Это имеет место в приводах роботов, манипуляторов, станков ЧПУ.

Простейшая двухфазная модель, поясняющая принцип работы шагового двигателя показана на рис. 5.19.

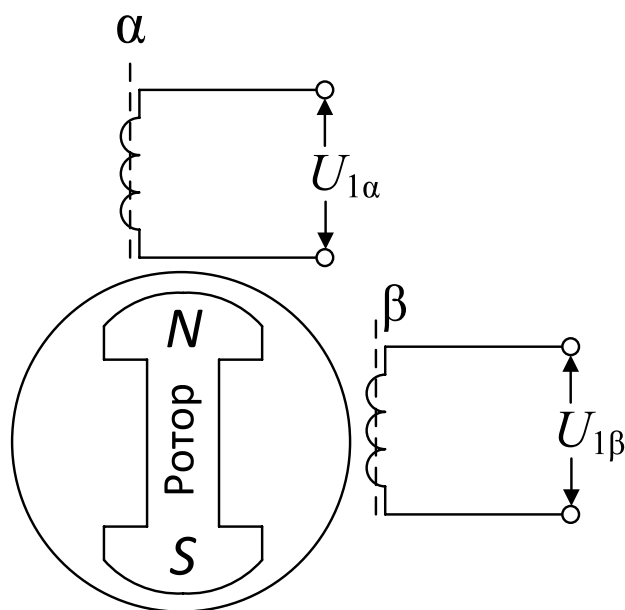


Рис. 5.19. Двухфазная модель шагового двигателя

Если обмотка статора по оси  $\alpha$  подключена к источнику с напряжением  $U_{1\alpha}$  и в ней протекает постоянный ток, а обмотка по оси  $\beta$  отключена, то создаваемое обмоткой  $\alpha$  поле статора будет взаимодействовать с полем ротора, вследствие чего возникает синхронизирующий момент. Ротор двигателя фиксируется в положении,

определяемом вектором поля статора с точностью, зависящей от нагрузки и жесткости электромагнитной угловой характеристики.

Переключение обмоток вызывает поворот ротора на один шаг, которому соответствует угол  $\Delta\varphi_{\text{ш}}$ . Средняя угловая скорость ротора определяется как

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{ш}}}{\Delta t_{\text{ш}}} = f\Delta\varphi_{\text{ш}},$$

где  $f$  – частота следования импульсов напряжения, поступающих на статорные обмотки.

В мехатронных модулях линейного движения, которые применяются в многоцелевых станках, комплексах лазерной резки, некоторых видах транспорта, используется линейный двигатель. Основными преимуществами линейного двигателя по сравнению с традиционным двигателем и передачей типа зубчатой рейки либо винтовой передачи, есть в несколько раз большая скорость движения и ускорение, высокая точность движения, жесткость характеристик. Линейные двигатели могут быть асинхронными, синхронными и постоянного тока. Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели.

Представление об устройстве линейного асинхронного двигателя (ЛАД) можно получить, если мысленно разрезать вдоль по образующей статор и ротор асинхронного двигателя вращательного движения и развернуть их в плоскости, как показано на рис. 5.20.

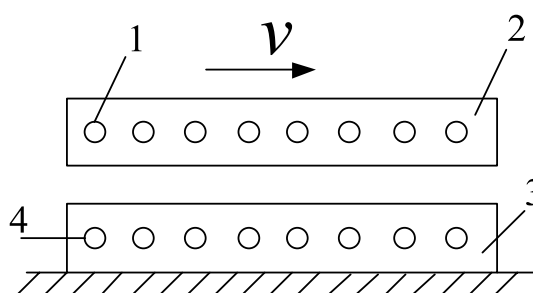


Рис. 5.20. К принципу действия ЛАД

Принцип действия ЛАД аналогичен вращающемуся асинхронному двигателю. При подключении обмотки 4 статора 3 к сети переменного тока она создает движущееся магнитное поле с линейной скоростью

$$\nu = 2\tau f_1,$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения,  $\tau$  – длина полюсного деления статора.

Линейно перемещающееся магнитное поле наводит в обмотке 1 ротора 2 ЭДС, под действием которой в ней протекает ток.

Взаимодействие этого тока с магнитным полем создает на роторе (его называют вторичным элементом) тяговое усилие, под действием которого и будет происходить движение.

ЛАД могут работать и в обращенном режиме, когда вторичный элемент неподвижен, а перемещается статор. Такие ЛАД обычно применяются на транспортных средствах, когда в качестве вторичного элемента используется рельс или специальная полоса, статор расположен на подвижном средстве.

Для ЛАД, как и обычного вращающегося асинхронного двигателя, регулирование скорости осуществляется путем изменения частоты питающего напряжения, а торможение – динамическое или противовключением.

## **5.6 Силовые преобразователи**

Силовые преобразователи применяются в различных мехатронных модулях движения, в которых превращение электрической энергии в полезную механическую работу осуществляют электродвигатели. Двигатель совместно с преобразователем обеспечивает регулирование той или иной координаты.

Рассмотрим силовые преобразователи, к которым подключаются электродвигатели. Свойства и основные характеристики этих двигателей изложены в гл. 5.5.

Для электропривода постоянного тока применяют два типа преобразователей: преобразователи напряжения переменного тока в постоянный (управляемый выпрямитель) и широтно-импульсные преобразователи неизменного напряжения постоянного тока в регулируемое напряжение постоянного тока.

Указанные преобразователи обладают рядом достоинств: высокий КПД, незначительная инерционность, достаточная плавность и достаточный диапазон регулирования выходного напряжения, высокая надежность.

Схема вентильного преобразователя, который чаще всего встречается в различных системах регулирования двигателя постоянного тока – трехфазная мостовая (схема Ларионова) с управляемым выпрямителем показана на рис. 5.21.

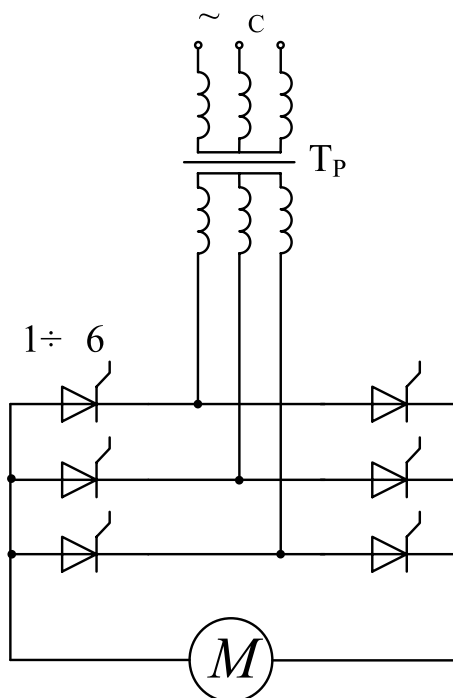


Рис. 5.21. Вентильный преобразователь

Плавное регулирование напряжения на якоре двигателя осуществляется путем изменения длительности работы тиристора в проводящую часть периода. Момент отпирания тиристора относительно точки естественной коммутации осуществляется с задержкой на угол  $\alpha$  (угол управления тиристоров). Изменение  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с помощью системы импульсно-фазового управления позволит получить регулировочные механические характеристики в первом и четвертом квадранте.

Для того чтобы получить характеристики во всех четырех квадрантах (реверсивные системы), схема дополняется еще одной вентильной группой. При этом используют совместное или раздельное управление группами вентилей.

Импульсные преобразователи постоянного напряжения, а к ним относятся широтно-импульсные преобразователи, позволяют получить на якоре двигателя плавно регулируемое напряжение при питании от сети постоянного тока с неизменным напряжением. В этом

случае между сетью и нагрузкой (якорь двигателя) вводят ключ, который подключает и отключает нагрузку от сети.

Роль ключа может выполнить транзистор  $VT1$ , как показано на рис. 5.22. Транзистор  $VT2$ , коммутируемый в противофазе с транзистором  $VT1$ , позволяет изменить направление тока в якоре и осуществить тормозной режим двигателя. Вентиль  $V$  обеспечивает протекание тока в цепи якоря при разомкнутом ключе. Плавное изменение длительности включенного состояния транзистора  $VT1$  с помощью системы управления обеспечивает регулирование среднего значения якорного напряжения:

$$U_{\text{яср}} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_{\text{П}},$$

где  $t_1$  – длительность включенного состояния ключа;  $t_2$  – длительность выключенного состояния ключа;  $T = t_1 + t_2$  – период следования импульсов якорного напряжения;  $f = 1/T$  – частота импульсов якорного напряжения.

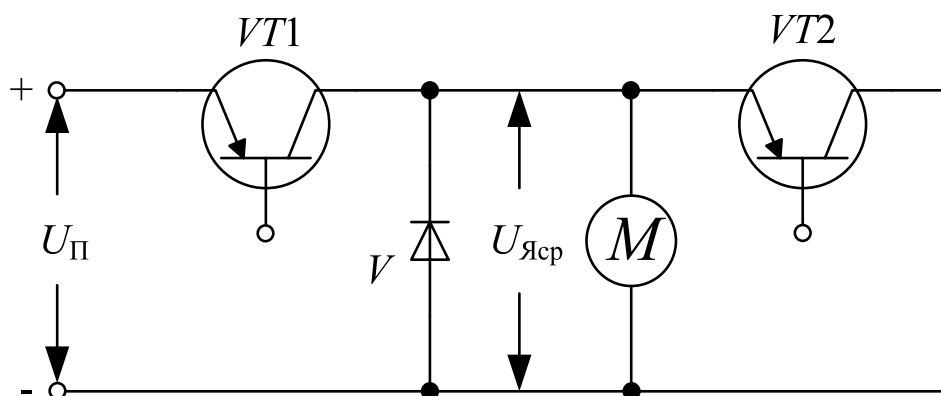
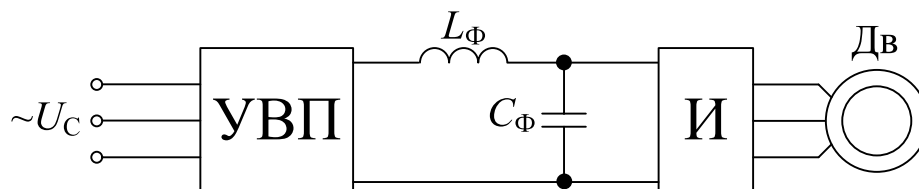


Рис. 5.22. Схема ШИП

В широтно-импульсном преобразователе частота исследования импульсов постоянна, а длительность импульсов плавно изменяется, что обеспечивает регулирование.

Для двигателей переменного тока, к которым можно отнести вентильные, шаговые и линейные двигатели, для регулирования скорости используют преобразователи частоты (ПЧ). Они обеспечивают преобразование энергии переменного тока постоянной частоты в энергию переменного тока с регулируемой частотой.

ПЧ строятся по схеме со звеном постоянного тока и с непосредственной связью с питающей сетью. ПЧ со звеном постоянного тока позволяют регулировать частоту вниз и вверх от номинальной, а, следовательно, и обеспечивает больший диапазон регулирования. Функциональная схема ПЧ со звеном постоянного тока изображена на рис. 5.23.



УВП – управляемый вентильный преобразователь, И – инвертор, Дв – двигатель переменного тока,  $L_\Phi$ ,  $C_\Phi$  – индуктивно-емкостной фильтр

Рис. 5.23. Функциональная схема ПЧ

Работу инвертора поясняет схема с идеальными механическими ключами и временные диаграммы (рис. 5.24).

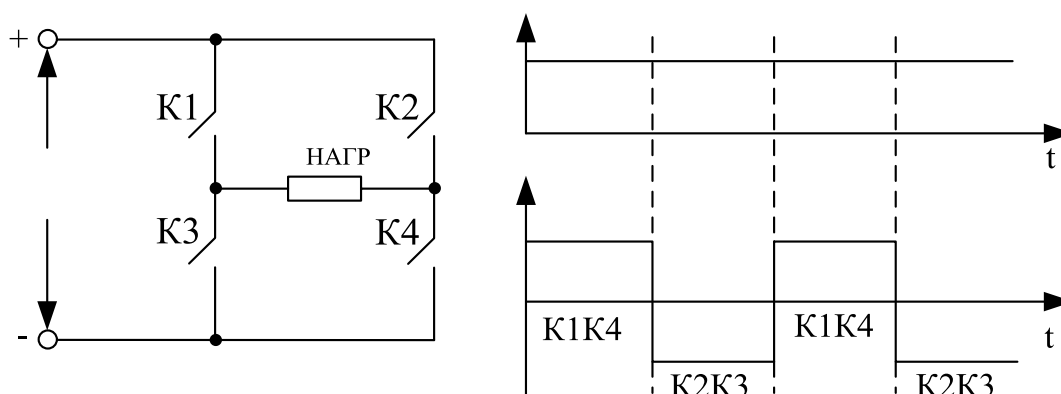


Рис. 5.24. Схема инвертора и временные диаграммы

Инвертор преобразует энергию постоянного тока, которая поступает с УВП, в энергию переменного. Так как нагрузка (обмотка двигателя) носит активно-индуктивный характер, то форма тока в ней в значительной степени приближается к синусоидальной.

В ряде случаев при изменении частоты изменяется и выходное напряжение УВП по закону:  $U/f = \text{const}$ . Данный закон регулирования обеспечивает неизменную перегрузочную способность двигателя во всем диапазоне изменения частот.

Схема ПЧ с непосредственной связью с питающей сетью состоит из трех одинаковых комплектов тиристоров, обеспечиваю-

щих питание обмоток статора  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$ . В свою очередь, каждый комплект содержит шесть тиристоров, три из которых подсоединены анодами, а три других катодами ко вторичным обмоткам трансформатора (рис. 5.25). Каждая фаза схемы работает независимо, поэтому для пояснения принципа получения заданной частоты выходного напряжения рассмотрим только работу вентилей  $V1-V6$  в фазе  $A$ . Допустим, от системы управления поступает управляющий импульс на тиристор  $V1$  в момент времени  $t_1$ , на  $V2$  в момент времени  $t_2$ , на  $V3$  в момент времени  $t_3$ .

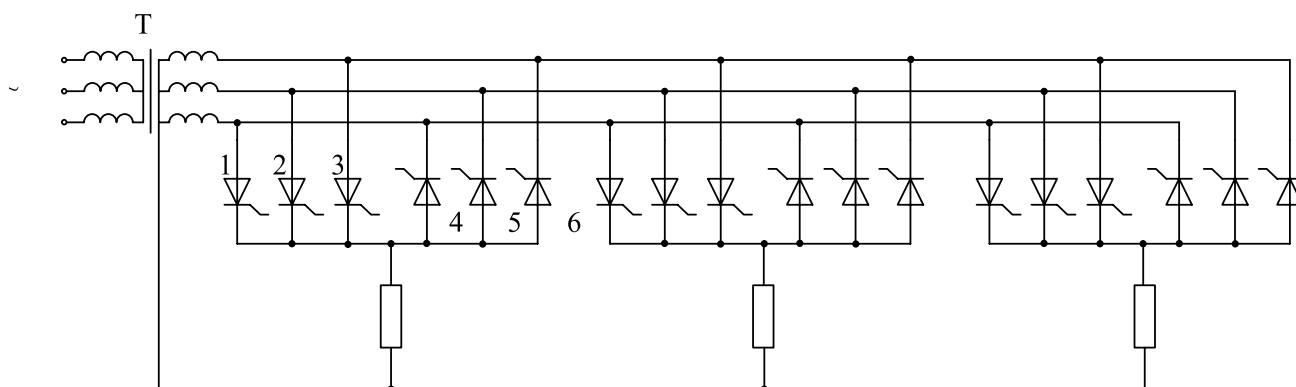


Рис. 5.25. Схема ПЧ с непосредственной связью с питающей сетью

Указанные тиристоры откроются, и к фазе  $A$  статора будет приложено напряжение, представляющее собой участки трех синусоид вторичных напряжений (рис. 5.26).

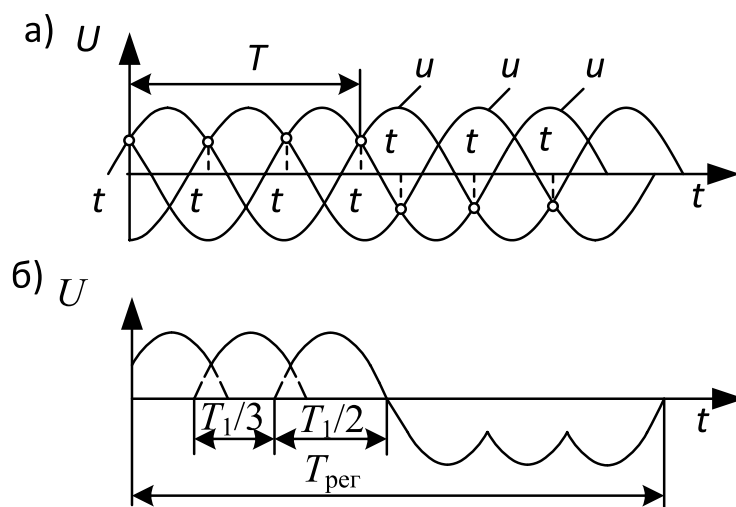


Рис. 5.26. Графики напряжений сети (а) и на выходе НППЧ (б)

Если снять управляющие импульсы с  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  и подать импульсы на  $V6$ ,  $V4$ ,  $V5$  в моменты  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $t_7$ , то на нагрузке образуется напряжения в виде участков синусоид, на узле противоположной полярности.

Таким образом, к фазе статора подводится напряжение переменного тока с периодом  $T_{\text{рег}}$ . Этот период больше, чем период сетевого напряжения  $T_1$ , или, другими словами, частота напряжения на статоре меньше, чем частота напряжения сети. Соотношение между этими величинами для трехфазной схемы

$$T_{\text{рег}} = T_1 \frac{[3 + 2(h - 1)]}{3},$$

где  $h = 2, 3 \dots$  – число открываемых тиристоров в группе.

Из приведенного соотношения следует, что ПЧ с непосредственной связью обеспечивает регулирование частоты в сторону уменьшения по сравнению с частотой напряжения сети.

В рассматриваемом преобразователе можно одновременно с частотой регулировать и напряжение. Достигается это тем, что управляющие импульсы подаются не в указанные моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и т.д., а с задержкой на угол управления тиристорами  $\alpha$ . Изменение с помощью системы управления  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  вызывает изменение напряжения от номинального до нулевого значения.

Возвращаясь к схеме, приведенной на рис. 5.26, необходимо отметить, что получение на статоре стандартной системы трехфазного напряжения со сдвигом фазных напряжений на треть периода достигается тем, что управляющие импульсы на комплекты тиристорov подаются со сдвигом на треть периода выходной регулируемой частоты. К достоинствам ПЧ с непосредственной связью можно отнести однократное преобразование энергии и, следовательно, высокий КПД (около 0,97-0,98), возможность независимого регулирования напряжения от частоты; возможность реализации режимов рекуперативного торможения.

## **5.7 Микропроцессорные системы управления**

Микропроцессорная система (МПС) это микро-ЭВМ или вычислительный комплекс (ВК), построенный на основе микропроцессорного комплекта (МПК) больших (БИС) и/или сверхбольших (СБИС) интегральных микросхем. В состав МПК могут входить микропро-



цессорные и другие интегральные микросхемы различных схемотехнических типов, если они совместимы по архитектуре, электрическим параметрам и конструктивному исполнению.

Сущность применения микропроцессоров заключается в том, что они заменяют цифровые ИС малой и средней степени интеграции и придают устройствам, в которых они используются, свойства «интеллектуальности».

Устройства и системы, построенные на основе микропроцессоров, имеют два основных преимущества перед устройствами, реализованными аппаратным способом:

- обладают более высокой функциональной гибкостью, т.к. их перестройка для решения новой задачи требует только смены программы без изменений аппаратной части;

- требуют меньшего количества элементов, чем устройства на логических микросхемах малой и средней степени интеграции.

МПС различаются областями применения, архитектурой и конструктивным исполнением. Архитектуру МПС можно описать тремя составляющими:

- состав, характеристики и структурная организация (взаимосвязь) устройств МПС;

- принцип функционирования;

- набор машинных команд, или инструкций (машинный язык).

Современные МПС реализуют архитектуру, которая воплощает, как правило, следующие принципы:

- принцип хранимой в памяти программы;

- принцип адресного обращения устройств МПС друг к другу;

- принцип магистрально-модульной структуры.

Важной характеристикой МПС является число центральных процессоров. По этому признаку различают следующие виды МПС:

- однопроцессорные системы;

- мультипроцессорные системы;

- многомашинные системы (вычислительные комплексы).

Можно выделить два основных вида однопроцессорных систем:

- микро-ЭВМ, ориентированные на определенные области применения, класс задач и/или пользователей (универсальные). Существует большое число видов универсальных микро-ЭВМ в сетевых информационно-вычислительных системах: персональные микро-ЭВМ и рабочие станции; серверы, маршрутизаторы и коммутаторы;

– специализированные микро-ЭВМ, или микроконтроллеры (МК). Специализированные микро-ЭВМ предназначены для решения одной или ограниченного числа задач с максимально возможной эффективностью. Микроконтроллеры используются для управления различными системами (от англ. control – управление).

Мультипроцессорные системы характеризуются тем, что каждый процессор относительно независимо выполняет свою программу, причем общая операционная система ОС распределяет нагрузку между процессорами.

Взаимодействие процессоров осуществляется через общую оперативную память ОП. ОС распределяет общие периферийные устройства между процессами. Таким образом, имеется возможность распараллеливать вычислительный процесс, а при отказе какого-либо процессора оперативно перераспределять работу между оставшимися процессорами. Благодаря такой организации достигается высокая производительность и отказоустойчивость.

#### *5.7.1 Универсальные микропроцессоры*

Микропроцессор (МП) является программно-управляемой СБИС, предназначенной для обработки цифровой информации. Типовыми узлами микропроцессора являются блок управления, регистры, сумматоры, счетчики команд и очень быстрая память малого объема (кэш-память, обычно статического типа). Некоторые микропроцессоры дополняются сопроцессорами, расширяющими возможности микропроцессоров и набор выполняемых команд.

Универсальные микропроцессоры предназначены для применения в вычислительных системах: персональных ЭВМ, рабочих станциях. Как правило, закладываемые в универсальные МП технические решения служат в первую очередь задаче получения максимального быстродействия, во вторую – задачам минимизации потребляемой мощности и стоимости.

МП характеризуются следующими параметрами.

Тактовая частота – частота повторения сигналов, синхронизирующих работу микросхем компьютера. Эти сигналы вырабатываются тактовым генератором центрального процессора и используются для создания единого стандарта времени для управления всеми процессами, происходящими в устройствах компьютера.

Разрядность – максимальное количество разрядов двоичного кода (бит), с которым может одновременно работать устройство.

Регистры – ячейки памяти внутри микропроцессора, в каждой из которых можно хранить одно число. Диапазон чисел, которые можно хранить в регистре, зависит от его разрядности. Основное назначение регистров – оперативное хранение операндов и адресов ячеек памяти. Поскольку регистры расположены непосредственно на кристалле микропроцессора, время обращения к ним мало и их можно считать сверхоперативным запоминающим устройством ЗУ.

Кэш-память – буферная память, в которой данные содержатся в совокупности с их адресом в основной памяти. Кэш-память имеет малый объем, малое время доступа и используется помимо основного ОЗУ. Ее применение позволяет сократить количество обращений к основному ОЗУ.

Инструкция – команда, указывающая микропроцессору на действие, которое необходимо выполнить.

Операнд – величина, представляющая собой объект операции, выполняемой ЭВМ.

Рассмотрим классификацию микропроцессоров. Так как задачи, выполняемые микропроцессорами, весьма разнообразны, причем в зависимости от программы один и тот же МП может реализовывать совершенно разные функции, то классификацию микропроцессоров принято вести по их архитектуре. При этом следует выделить два основных качественных признака:

- используемый набор команд;
- метод работы с памятью.

Рассмотрим эти два признака.

*Используемый набор команд.*

Микропроцессор с CISC-архитектурой (Complicated Instruction Set Computer – CISC), он же компьютер со сложным набором команд. Эту архитектуру также называют «классической», так как она была разработана первой и долгое время оставалась единственной. МП с CISC – архитектурой применяются, как правило, в персональных компьютерах и серверах. Команды таких МП имеют много разных форматов и требуют для своего представления различного числа ячеек. Это обуславливает определение типа команды в ходе ее дешифрации при исполнении, что усложняет устройство управления процессора и препятствует повышению тактовой частоты до уровня, достижимого в RISC-процессорах на той же элементной базе. Лидером в производстве процессоров с CISC-архитектурой является

фирма Intel, микропроцессорами которой комплектуется более 80 % выпускаемых персональных компьютеров.

Микропроцессор с RISC-архитектурой (Reduced Instruction Set Computer – RISC), он же компьютер с сокращенным набором команд. В начале 80-х годов архитектура CISC стала серьезным препятствием на пути развития микропроцессорной техники, поскольку для работы с «традиционным» расширенным списком команд стало требоваться очень сложное устройство центрального управления, занимающее до 60 % всей площади кристалла. Тогда же был проведен анализ машинного кода, генерируемого компиляторами языков высокого уровня. Этот анализ показал, что в таком коде используется весьма ограниченный набор простых команд. Идея, заложенная в основу RISC-архитектуры, такова: оставить в системе команд наиболее употребляемые и универсальные инструкции, исключив сложные и редко используемые. Результатом стало существенное упрощение центрального управления и высвобождение части поверхности кристалла процессора для размещения более мощных средств обработки данных.

Цель сокращения системы команд состоит в получении более компактных программ и ускорении их выполнения. Компактный код программы получается вследствие того, что все команды имеют размер в одно слово. Это предполагает, что все инструкции имеют одну длину и выбираются за один машинный цикл. Сокращенный набор команд предполагает быстрое обучение программиста. Однако следует отметить известный факт, что при изучении ассемблера для RISC программистов, привыкших к CISC, возникают трудности, связанные с разительным отличием системы команд.

#### *Методы работы с памятью.*

В январе 1945 года Джон фон Нейман, математик венгерского происхождения, предложил архитектуру процессора с объединенной памятью программ и данных. Машина фон Неймана была создана в Принстонском институте новейших исследований в 1951 году. С тех пор это простое решение широко применяется в большинстве компьютеров и называется «неймановская архитектура». Она содержит три основных функциональных блока: память; арифметико-логическое устройство (АЛУ); блок ввода/вывода.

Для выполнения каждой операции АЛУ обращается по одной и той же линии связи (шине) сначала к памяти программ, а потом к памяти данных. Устройство ввода/вывода управляет потоком внеш-

них данных. Архитектура фон Неймана использует только одну шину памяти. Она очень дешевая, требует меньшего количества выводов шины и является простой в использовании, так как программист может размещать и команды, и данные в любом месте свободной памяти. Главное преимущество неймановской архитектуры – универсальность.

Один и тот же компьютер можно использовать в самых разных целях: и для разработки, и для выполнения готовых приложений. По этой архитектуре строились первые DSP, однако со временем они были практически полностью вытеснены DSP на основе гарвардской архитектуры и ее модификаций.

Гарвардская архитектура была разработана в конце 30-х годов Говардом Айхеном в Гарвардском университете (отсюда и название) с целью оптимизации работы памяти и увеличения скорости выполнения операций. Первая машина Harvard Mark I заработала в 1944 году. До конца 70-х годов гарвардская архитектура почти не использовалась, пока производители МК не поняли, что она дает преимущества разработчикам автономных систем управления.

Главное отличие гарвардской архитектуры от неймановской состоит в том, что память программ и память данных физически разделены и используют собственные линии связи с АЛУ. Это позволяет пересылать команды и данные одновременно и, следовательно, увеличить производительность процессора. Гарвардская архитектура требует наличия двух шин памяти. Это значительно повышает количество выводов МП и стоимость производства чипа.

Часто необходимо произвести выборку не двух, а трех компонентов – инструкции с двумя операндами, на что классическая гарвардская архитектура неспособна. Для таких случаев данная архитектура дополняется кэш-памятью. Она применяется для хранения тех инструкций, которые будут использоваться вновь. Кэш-память позволяет освободить шину адреса и шину данных, что делает возможным выборку двух операндов. Такую архитектуру называют расширенной гарвардской архитектурой (Super Harvard ARChitecture – SHARC).

Но подобная схема реализации доступа к памяти имеет очевидный недостаток: чтобы разделить каналы передачи адреса и данных, на кристалле необходимо сделать в два раза больше выводов. Для решения этой проблемы был использован следующий прием: внешние данные передаются по общей шине данных и шине

адреса, а внутри кристалла эти данные расходятся на шину данных, шину команд и две шины адреса. Такой подход позволяет избежать увеличения числа выводов без особого ущерба для производительности.

Рассмотрим обобщенную структуру микропроцессорного ядра (рис. 5.27). Условно в ней можно выделить блок обработки команд и блок обработки данных. Блок обработки команд состоит из регистра команд (РК) и управляющего устройства (УУ). Блок обработки данных включает АЛУ, регистр-накопитель, буферный регистр (БР), регистр признаков (РП), блок регистров общего назначения (БРОН) и регистр адреса (РА). Рассмотрим более подробно функциональные блоки, представленные на рис. 5.27.

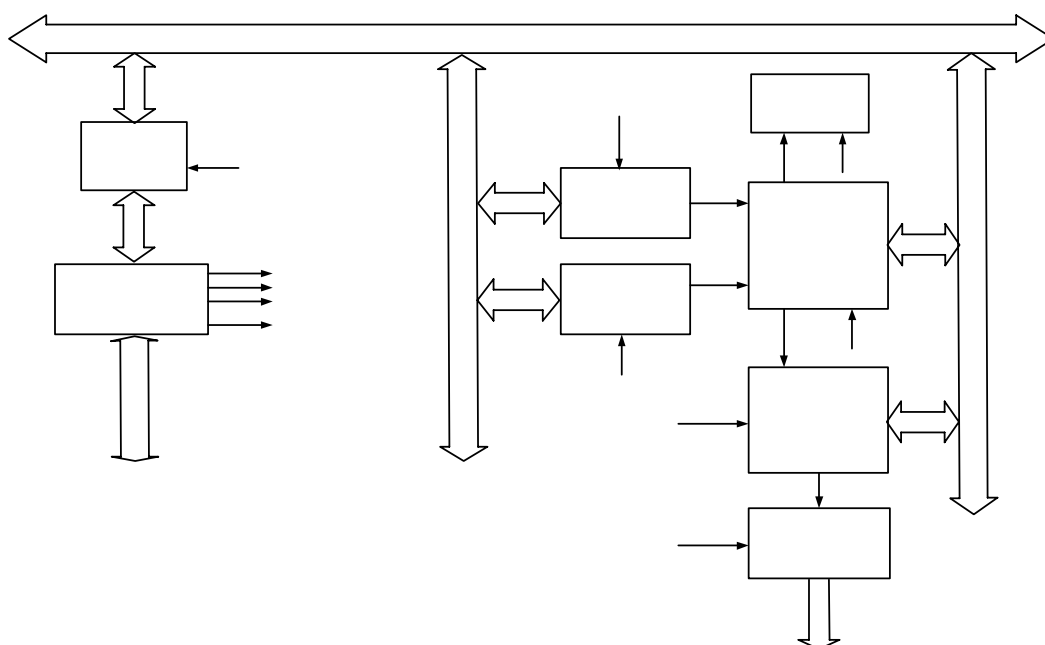


Рис. 5.27. Обобщенная структура микропроцессорного ядра

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является одной из важнейших частей микропроцессора. Оно предназначено для выполнения арифметических и логических операций над числами в двоичном коде. АЛУ строится на базе параллельного сумматора, поэтому для него базовой операцией является операция сложения двоичных чисел. Другие операции выполняются АЛУ с помощью специальных команд, двоичные коды которых хранятся во внешней памяти. В состав арифметических операций, кроме сложения, входят операции вычитания, сравнения, поразрядного умножения, а также логические операции «И», «ИЛИ» и «НЕ».

Для АЛУ важнейшей характеристикой является разрядность, которая и определяет разрядность всего МП. Поскольку любая цифра из диапазона от «0» до «9» может быть закодирована четырьмя двоичными разрядами, то для выполнения арифметических операций достаточно иметь 4-разрядное АЛУ. Однако этого недостаточно для обработки текстовой информации, так как символы принято кодировать 8-разрядным двоичным кодом. Именно поэтому в свое время разработчики МП перешли от 4-разрядных АЛУ к 8-разрядным. Разрядность АЛУ в современных микропроцессорах может достигать до 64, что позволяет эффективно работать с большими числами, а также упрощать адресацию при работе с большими объемами данных.

Программный счетчик (на схеме не показан) используется для формирования адреса очередной выполняемой команды. Команды размещаются в ячейках памяти с последовательными адресами. После того как очередная ячейка памяти считана в микропроцессор, содержимое счетчика увеличивается на 1. Процедура увеличения содержимого счетчика повторяется при выполнении всех команд программы. При необходимости изменения порядка выполнения программы (например, при организации условных и безусловных переходов) содержимое счетчика подвергается изменению с помощью специальных команд. Разрядность счетчика команд соответствует разрядности адресов ячеек памяти, т.е. разрядности шины данных.

Как видно из рис. 5.27, в состав микропроцессора входит несколько регистров, объединенных в блок регистров. По своему назначению регистры МП разделяются на две категории:

- регистры общего назначения;
- специальные регистры.

Регистры общего назначения (РОН) выполняют функции сверхоперативной памяти. Наличие РОН на кристалле МП расширяет его внутренние возможности по хранению данных и позволяет увеличить производительность МП без увеличения тактовой частоты. Все РОН программно адресуемы.

Рассмотрим специальные регистры микропроцессоров. Входы регистра-накопителя (аккумулятора) и буферного регистра подключены к внутренней магистрали микропроцессора, а выходы – к входу АЛУ. Эти регистры применяются для выполнения арифметических и логических операций, а их разрядности всегда равны. Буферный регистр нужен исключительно для временного хранения одного из

операндов, участвующих в операции. Аккумулятор выполняет такую же функцию, однако после завершения операции в него записывается ее результат, т.е. аккумулятор участвует во всех арифметических операциях. Кроме того, аккумулятор используется для ввода и вывода данных к внешним устройствам. Следует заметить, что существуют микропроцессоры, в которых отсутствует буферный регистр, и тогда второй операнд поступает в АЛУ через внутреннюю магистраль МП из РОН или из внешней памяти.

Регистр признаков предназначен для хранения результата логической или арифметической операции, выполненной в АЛУ. В качестве результатов могут выступать самые разнообразные признаки: признак нулевого результата, признак четности единиц в результате, признак переноса единицы в старший разряд и т.д. Количество признаков и их назначение может изменяться в зависимости от модели и производителя микропроцессора. Однако правило записи информации о признаках всегда одинаково: логическая единица соответствует удовлетворению признака. С помощью специальных команд возможно получение информации о любом разряде регистра признаков или извлечение его содержимого для дальнейшего применения. Признаки используются для организации условных переходов в программах.

Для выполнения команд программы ее код, записанный в память системы, считывается и по шине данных пересылается в регистр команд, где и хранится до момента записи кода следующей команды. Разрядность регистра команд совпадает с разрядностью АЛУ микропроцессора.

Регистр адреса предназначен для хранения адреса очередной выполняемой команды. Этот адрес формируется программным счетчиком команд. Регистр адреса позволяет организовать переходы в процессе выполнения программы с помощью изменения содержимого регистра.

Управляющее устройство (УУ) управляет работой всех блоков микропроцессора и внешними устройствами системы с помощью формирования управляющих сигналов. Для управления внутренними устройствами УУ вырабатывает группу сигналов СУ, для управления внешними устройствами – сигналы, входящие в состав шины управления. Комбинация управляющих сигналов, необходимая для выполнения определенной команды, формируется в результате дешифрации кода команды, который хранится в регистре команд.



Для связи МП с внешними устройствами используются следующие шины

МП (также называемые магистралями):

- шина адреса. Является однонаправленной и применяется для передачи цифрового адреса (ячейки памяти или устройства) от микропроцессора к внешним устройствам (в том числе и ОЗУ);

- шина данных. Двухнаправленная шина, используемая для передачи данных от микропроцессора к внешним устройствам и в противоположном направлении;

- шина управления. Эта шина используется для передачи сигналов управления от МП к внешним устройствам и наоборот. Однако, в отличие от шины данных, эта шина является квазидвухнаправленной, т.е. каждый ее сигнальный провод используется для передачи сигнала только в одном направлении.

*Неймановская и гарвардская архитектуры МП.*

Общий вид системы, построенной по неймановской архитектуре, представлен на рис. 5.28. Как видно из рисунка, каждое обращение к памяти проходит через соответствующий интерфейс. Это приводит к повышенной нагрузке на шины адреса и данных, что может снизить общую производительность МП.



Рис. 5.28. Микропроцессорная система с неймановской архитектурой

Гарвардская архитектура (рис. 5.29) решает проблему большого количества обращений к памяти с помощью разделения областей памяти программ и данных. Теперь команды поступают на дешифратор независимо от данных, которыми обменивается процессор с ОЗУ. За счет этого становится возможным повысить быстродействие микропроцессора (особенно в операциях обработки массивов данных). Однако за это приходится платить усложнением адресации (в гарвардской архитектуре – два адресных пространства).

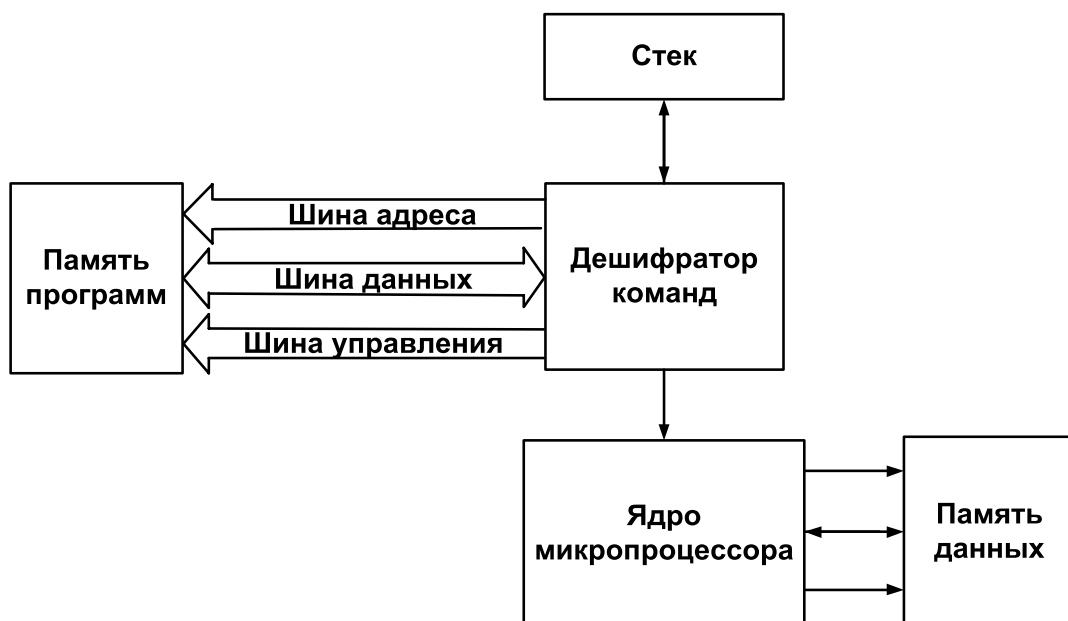


Рис. 5.29. Микропроцессорная система с гарвардской архитектурой

### 5.7.2 Микроконтроллеры

Особенностью построения современных технических систем, в том числе мехатронных, является широкая автоматизация процессов, контроля их состояния и управления их состоянием с помощью, так называемых контроллеров (устройств управления). Именно для создания подобных устройств используется в настоящее время большая часть выпускаемой электронной продукции. С целью сокращения аппаратных затрат при построении контроллеров и снижения их стоимости производятся однокристальные микроконтроллеры (МК или ОМК, MCU – Microcontroller Unit), выполненные в виде отдельных БИС.

Если персональные компьютеры ориентированы на пользователя, то микроконтроллеры – на объект управления. В отличие от микропроцессоров МК включают все устройства, необходимые для реализации цифровых систем управления минимальной конфигурации: процессор, запоминающее устройство данных, запоминающее устройство команд, внутренний генератор тактовых сигналов, а также программируемую интегральную схему для связи с внешней средой. МК позволяют добиться небольших габаритов устройств, малой потребляемой мощности, а также возможности быстрой модификации алгоритмов работы.

Наибольшей специализацией и разнообразием функций обладают микроконтроллеры, используемые во встроенных системах

управления, в том числе в бытовых приборах. Общее число типов кристаллов с различными системами команд превышает 500. В настоящее время самыми распространенными и доступными (хотя и не единственными) являются микроконтроллеры семейств PIC (фирма Microchip) и AVR (фирма Atmel).

Спектр применения МК чрезвычайно широк. В наши дни на их базе создают интеллектуальные датчики, системы управления электродвигателями, промышленные роботы, микро-АТС, автоответчики, АОНы, мобильные телефоны, зарядные устройства, факсы, модемы, пейджеры, таймеры, системы сигнализации, измерительные приборы, счетчики воды, газа и электроэнергии, дозиметры, приборы сигнализации, системы управления зажиганием и впрыском топлива, приборные панели и радарные детекторы, регуляторы температуры, влажности, давления и пр., схемы управления принтерами и плоттерами, сетевые контроллеры, сканеры, схемы управления аудио- и видеосистемами, системы синтеза речевых сообщений, видеоигры, системы дистанционного управления, кассовые аппараты и т. д.

Быстрое развитие и распространение МК обусловлено их универсальностью и низкой стоимостью. Современные микроконтроллеры обладают всеми ресурсами для решения задач управления и при этом производятся в таком разнообразии, что могут удовлетворить практически любые потребности. Сейчас именно они являются средством реализации блочного подхода к построению устройств электронной техники.

Устройствами ввода в микроконтроллеры являются преобразователи информации, а именно датчики, установленные на объекте управления. Датчики преобразуют неэлектрические величины в электрические сигналы. В состав микроконтроллеров обычно входят преобразователи аналоговых сигналов в цифровой код – аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Устройствами вывода микроконтроллеров являются исполнительные механизмы объектов, как правило, это – электронная система управления электрическими проводами. Для сопряжения выхода МК с системой привода в состав микроконтроллеров обычно входят также преобразователи цифрового кода в аналоговые сигналы – цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

Микроконтроллеры обычно работают в реальном масштабе времени и выполняют ограниченный набор программ, повторяющихся во времени. В отличие от ПК микроконтроллеры не требуют

больших вычислительных ресурсов (памяти команд и данных), причем алгоритмы преобразования в программах МК просты и сводятся к арифметическим и логическим операциям. Каждая команда микроконтроллера, как правило, это – программа, написанная на языке команд МП.

Простейший микроконтроллер состоит из одной БИС, на которой размещаются все устройства цифровой ЭВМ и преобразователи информации. Более сложные многоплатные конструкции микроконтроллеров, как правило, содержат универсальный МП.

### *5.7.3 Цифровые сигнальные процессоры*

Цифровые сигнальные процессоры (Digital Signal Processor – DSP) являются разновидностью микропроцессоров и предназначены для обработки в реальном времени цифровых потоков данных, образованных в результате оцифровывания аналоговых сигналов. Современные DSP способны проводить вычисления с «плавающей» точкой над операндами длиной до 40 разрядов.

Поскольку отличительной особенностью задач цифровой обработки сигналов является поточный характер обработки больших объемов данных в реальном режиме времени, то основными требованиями, предъявляемыми к DSP, являются высокая производительность и обеспечение возможности интенсивного обмена данными с внешними устройствами.

Соответствие этим требованиям в настоящее время достигается благодаря следующим особенностям:

- применению RISC-архитектуры;
- большой разрядности;
- аппаратной поддержке программных циклов и буферов;
- возможности множественного доступа к памяти;
- наличию кэш-памяти.

Также для сигнальных процессоров характерным является наличие аппаратного умножителя, позволяющего выполнять умножение двух чисел за один командный такт (в универсальных микропроцессорах умножение обычно реализуется как последовательность операций сдвига и сложения, что требует нескольких тактов). Основными производителями DSP являются фирмы: Texas Instruments, Lucent Technologies (более 50 % рынка), Analog Devices, Motorola.

Многие современные DSP поддерживают вычисления, идущие в несколько потоков. Это достигается путем реализации нескольких

идентичных процессорных ядер на одном кристалле. Таким образом, можно существенно повысить производительность DSP, не повышая тактовой частоты, за счет распараллеливания процесса обработки сигналов (например, обработка разными ядрами отдельных каналов связи).

DSP являются разновидностью микропроцессоров, поэтому для них существует два типа архитектуры – неймановская и гарвардская. Отметим, что первые DSP строились с неймановской архитектурой, однако со временем они были практически полностью вытеснены DSP на основе гарвардской архитектуры и ее модификаций. Главное преимущество гарвардской архитектуры по сравнению с неймановской состоит в повышении производительности за счет возможности пересылать команды и данные одновременно из физически разделенных памяти программ и памяти данных по собственным линиям связи с АЛУ.

## **5.8 Интеграция мехатронных модулей**

Конструкция современных мехатронных систем основана на модульных принципах и технологиях. Мехатронные модули (ММ) служат в качестве конструктивной основы при компоновке многомерных мехатронных машин и комплексов.

*Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное изделие для реализации движений с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу.*

К элементам различной физической природы относят механические (преобразователи движения, трансмиссии, звенья), электротехнические (двигатели, тормоза, муфты), электронные (электронные блоки и микропроцессоры) и информационные (датчики информации) элементы. Классификация мехатронных модулей по конструктивным признакам представлена на рис. 5.1.

Рассмотрим более подробно мехатронные модули, в зависимости от уровня их интеграции.

### **5.8.1 Модули движения**

Модуль движения (МД) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую) и электротехническую части, которое

можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Главным отличительным признаком МД от общепромышленного привода является использование вала двигателя в качестве одного из элементов механического преобразователя движения. Примерами МД являются мотор-редукторы, мотор-колесо, мотор-барабан, электрошпиндель.

В 1927 г. фирмой «Бауэр» была разработана принципиально новая конструкция – мотор-редуктор, объединившая в один компактный конструкционный модуль электродвигатель и механический преобразователь движения (редуктор) и получившая в настоящее время широкое распространение. С тех пор появилась огромная гамма различных мотор-редукторов для различных условий применения, которые позволяют найти оптимальное решение в каждом конкретном случае.

Конструктивное объединение электродвигателя и преобразователя движения в единый компактный электропривод – мотор-редуктор имеет ряд преимуществ по сравнению с устаревшей системой соединения электродвигателя и преобразователя движения через муфту. Это и значительное сокращение габаритных размеров, существенное уменьшение количества присоединительных деталей, и затрат на установку, отладку и запуск. Таким образом, мотор-редуктор является в настоящее время одним из наиболее распространенных видов электропривода. Мотор-редукторы при необходимости снабжают фотоимпульсными датчиками, резольверами и тормозами.

Мотор-редуктор (рис. 5.30) состоит из двух основных элементов: электродвигателя *М* и преобразователя движения (редуктора) 2, имеющего стыковочную поверхность 3 с отверстиями для крепления к ней электродвигателя винтами и болтами 4. При объединении электродвигателя и редуктора в единый конструктивный модуль вал 5 электродвигателя вставляют во входной полый вал 6 редуктора и закрепляют шпонкой 7.

В мотор-редукторах в качестве электродвигателей наиболее часто используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемым преобразователем частоты вращения вала, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока, а также шаговые двигатели. В качестве механических преобразователей движения используют зубчатые цилиндрические и конические червячные, планетарные, волновые, винтовые, прецизионные шарико- и роликовинтовые передачи с короткими и длинными резьбовыми роликами.

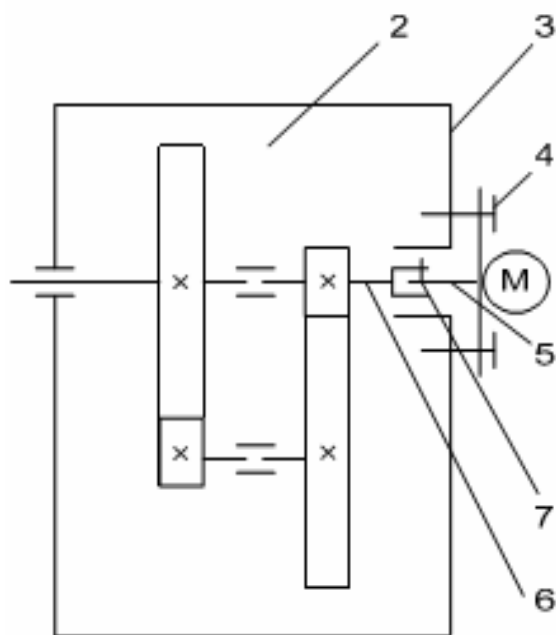


Рис. 5.30. Цилиндрический мотор-редуктор

ОАО «Электропривод» разрабатывает и изготавливает, электро-механизмы вращательного и поступательного движения, которые отличаются наименьшими массогабаритными показателями и высокой степенью надежности, предназначенные для авиационной техники, атомных электростанций, нефтегазового комплекса и других отраслей промышленности.

Электромеханизмы по типу движения выходного звена делятся на две группы: с вращательным движением выходного вала и поступательным движением выходного штока.

Среди однодвигательных электромеханизмов общего применения рассмотрим электромеханизм МРС-1, предназначенный для регулирования по росту сидения катапультных кресел летчиков. В нем применен вентильный электродвигатель мощностью 50 Вт со встроенным малогабаритным модулем управления.

Основные технические характеристики электромеханизма:

- напряжение питания постоянного тока – 27 В;
- нагрузочный противодействующий момент – 5,9 Н·м;
- частота вращения выходного вала – 60 об/мин;
- масса – 2 кг;
- режим работы – повторно-кратковременный.

Для привода наземной запорно-регулирующей арматуры разработаны электромеханизмы МВ10Д1,5 и МВ25ТД1,5 с электропитанием от промышленной 3-х фазной сети.

Электромеханизмы имеют встроенные регулируемые концевые выключатели и сигнализацию крайних положений выходного вала, защиту от перегрузок с сигнализацией, визуальную сигнализацию текущего положения выходного вала, встроенный потенциометрический датчик обратной связи и безопасный ручной привод для поворота выходного вала в обесточенном состоянии электромеханизма. Основные технические характеристики электромеханизма МВ25ТД1,5:

- напряжение питания, 220/380 В, частота 50 Гц;
- номинальный нагрузочный момент на валу – 250 Н·м;
- момент срабатывания муфты ограничения нагрузочного момента – 320-500 Н·м;
- диапазон регулирования угла поворота выходного вала, 36-180 град;
- частота вращения при номинальном нагрузочном моменте – 1,5 об/мин;
- масса – 10 кг;
- габариты – 245 × 248 × 270 мм;
- диапазон рабочей температуры –60...+50 °С.

### *5.8.2 Мехатронные модули движения*

Мехатронный модуль движения (ММД) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую), электротехническую, электронную и информационную части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями. В отличие от модулей движения (МД) в мехатронных модулях движения (ММД) появились электронные и информационные устройства.

Мехатронные модули движения являются базовыми функциональными устройствами, из которых можно компоновать сложные мехатронные системы.

Примеры мехатронных модулей движения: мехатронные модули движения на основе электродвигателей углового и линейного движения и различных преобразователей движения (винтовых, червячных, планетарных и волновых), безредукторные мехатронные модули движения, безредукторные поворотные столы.

Мехатронный модуль движения состоит из следующих основных частей.



Электродвигатель – преобразователь электрической энергии в механическую.

Механический преобразователь – устройство, преобразующее параметры движения двигателя в требуемые параметры движения выходного звена (может отсутствовать).

В состав механического преобразователя входят:

- преобразователь движения (передача) – механизм, предназначенный для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена мехатронного модуля;

- тормозное устройство – устройство, предназначенное для уменьшения скорости подвижного звена, останова и удержания его в неподвижном состоянии (может отсутствовать);

- люфтовыбирающий механизм – устройство, предназначенное для выборки зазора (мертвого хода) в некоторых видах преобразователей движения (может отсутствовать);

- направляющие – устройства, обеспечивающие заданное относительное движение выходного звена мехатронного модуля (может отсутствовать).

Информационное устройство – устройство, преобразующее контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а, также для воздействия им на управляемые процессы.

На рис. 5.31 показана схема мехатронного поворотного стола, предназначенного для позиционирования или вращения по заданной программе закрепленной на планшайбе детали для проведения измерительных и разметочных операций или для обработки детали на металлорежущих станках сверлильно-фрезерно-расточной группы.

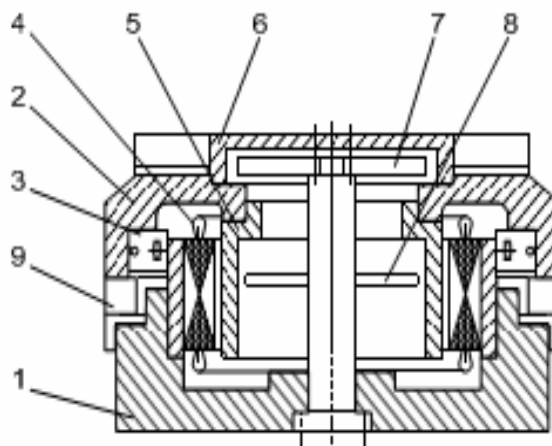
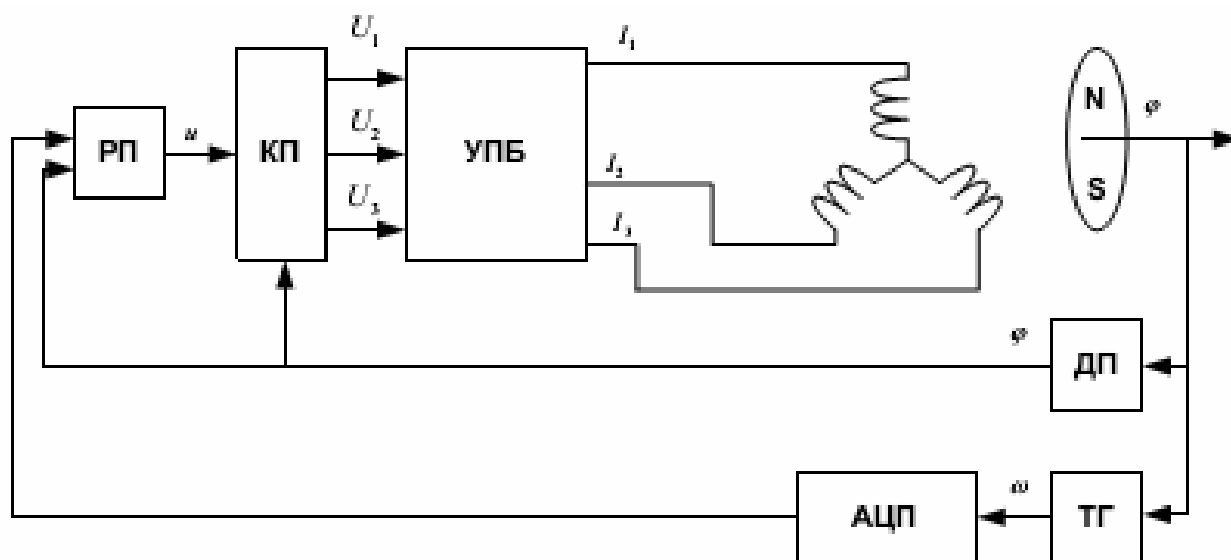


Рис. 5.31. Схема мехатронного поворотного стола

Мехатронный модуль состоит из основания 1 и собственно поворотного стола 2, опирающегося на упорные подшипники 3, встроенного бесконтактного трехфазного электродвигателя 4, ротор 5 которого скреплен с планшайбой 6, датчика 7 положения, датчика 8 скорости и гидротормоза 9, обеспечивающего фиксацию планшайбы в нужном положении. Безредукторное совмещение ротора электродвигателя и планшайбы позволяет полностью исключить люфт и соответственно увеличить точность позиционирования стола и расширить его технологические возможности. При этом упрощается конструкция стола, уменьшается число деталей, повышается жесткость.

Функциональная схема мехатронного поворотного стола представлена на рис. 5.32.



УПБ – усилительно-преобразовательный блок;

КП – координатный преобразователь; РП – регулятор положения

Рис. 5.32. Функциональная схема мехатронного поворотного стола

Стол выполнен на основе трехфазного синхронного двигателя. На статоре расположены обмотки, а на роторе – постоянные магниты. Ось ротора связана с датчиком положения (ДП), определяющим угол поворота ротора  $\varphi$ . Дополнительно мехатронный поворотный стол снабжен: датчиками тока (в каждой фазе статорной обмотки), регуляторами фазовых токов, усилителем, тахогенератором (ТГ) и аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Датчики тока, регуляторы и усилитель объединены в единый усилительно-преобразовательный блок (УПБ).

Сигнал с ДП подается на вход координатного преобразователя (КП), на второй вход которого из регулятора положения (РП) поступает немодулированный сигнал управления  $u$ . Микропроцессорный КП вычисляет фазные напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ , меняющиеся по синусоидальному закону в функции электрического угла  $\varphi_3 = p \varphi$  ( $p$  – число пар полюсов) и сдвинутые относительно друг друга на 120 электрических градусов. Эти напряжения усиливаются по мощности в УПБ и прикладываются к обмоткам статора. Переменные токи статора  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  порождают пульсирующие магнитные поля, суперпозицией которых является вращающееся магнитное поле статора. В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора возникает вращающий момент, приводящий ротор в движение. При подаче постоянного входного сигнала  $u$  разгон двигателя осуществляется до тех пор, пока величины противо-ЭДС  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  не уравниваются фазовые напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ .

### *5.8.3 Интеллектуальные мехатронные модули*

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 стала возможной благодаря бурному развитию микропроцессорных систем, ориентированных на задачи управления движением. Совершенствование производственных технологий изготовления микропроцессоров и микроконтроллеров обеспечивает стабильное снижение их стоимости, что повышает рентабельность практического внедрения.

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

- развитие интегрированных интерфейсов, связывающих управляющий контроллер с компьютером верхнего уровня в единый аппаратно-программный управляющий комплекс;
- создание интеллектуальных силовых модулей управления путем интеграции управляющих контроллеров и силовых преобразователей;

– разработка интеллектуальных сенсоров мехатронных модулей, которые кроме функций измерения осуществляют компьютерную обработку и преобразование сигналов.

Рассмотрим тенденции и способы технической реализации устройств компьютерного управления (УКУ) в современных мехатронных модулях.

#### *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.

Укрупненно задачу управления движением мехатронных систем можно разделить 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 задание 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. Такая структура, как правило, применяется для многокоординатных мехатронных систем с интеллектуальными методами управления (рис. 5.33).

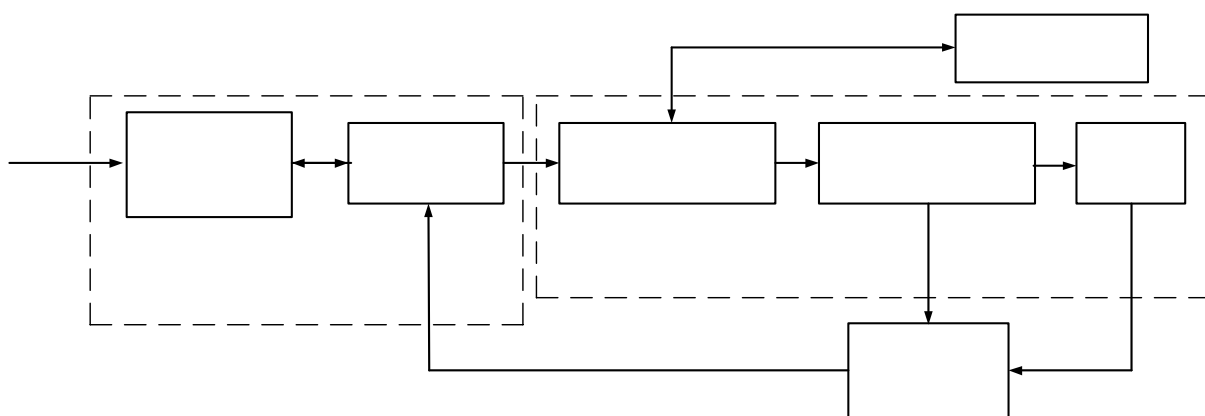


Рис. 5.33. Структура системы управления движением

В простейших модулях используют контроллеры, функции которых ограничены задачей управления механическим движением по одной координате (редко по двум). Необходимость их программирования непосредственно оператором на языке достаточно низ-

кого уровня, малое количество каналов связи и ограниченный объем памяти делают эти контроллеры неперспективными.

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 можно только используя замкнутые системы управления.

Для реализации функциональных движений контроллеры имеют также дополнительные входы/выходы для связи с внешним оборудованием. Как правило, это дискретные сигналы ввода/вывода. В промышленных системах автоматики для связи с оборудованием широко применяются программируемые логические контроллеры (ПЛК). При этом обмен информацией между контроллерами управления движением и ПЛК возможен через блок дискретных входов/выходов.

Наиболее распространены 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  $-10$  В до  $+10$  В). С энергетической точки зрения выгодным считается метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при управлении силовыми ключами преобразователя.

При создании интеллектуального мехатронного модуля возможны два базовых варианта 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, диспетчеризации и управления работой всех контроллеров комплекса. Архитектура на базе встраиваемых контроллеров ориентирована на задачи управления движением нескольких мехатронных модулей, входящих в состав, как правило, одной мехатронной системы.

Рассмотрим блок-схему УКУ с «внешним контроллером» (рис. 5.34). Гибкость управления обеспечивается применением микропроцессора. 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. Эти команды задают желаемые законы изменения во времени положения, скорости и ускорения вала исполнительного двигателя.

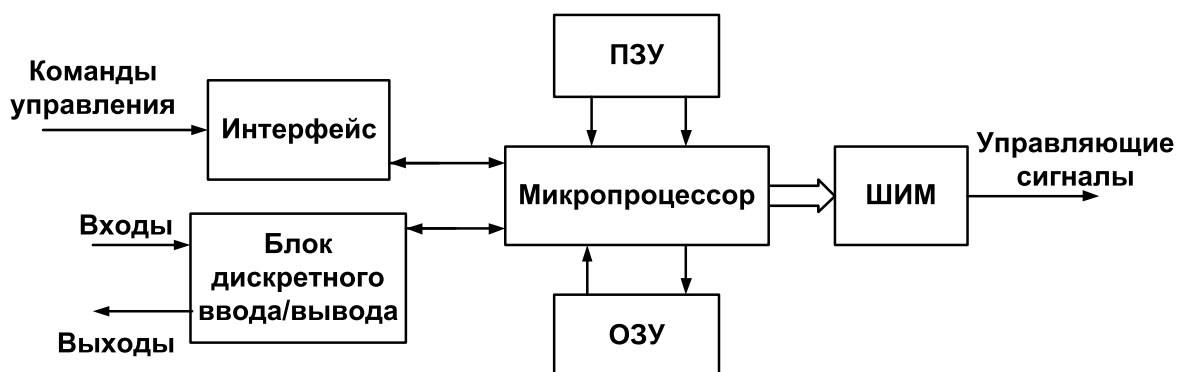


Рис. 5.34. Блок-схема контроллера движения

Архитектура типа «встраиваемый контроллер» заключается в использовании персонального компьютера (РС) 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 едином устройстве.

Важным достоинством такого подхода с точки зрения пользователя является интеграция стандартных операционных систем и программных продуктов 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 РС промышленного исполнения гарантирует эффективную защиту аппаратной части от тепловых, вибрационных и других воздействий производственной среды.

Технически встраиваемые контроллеры движения выпускаются в виде специальных плат, устанавливаемых в дополнительный слот РС. Обмен данными между контроллером и РС осуществляется через стандартную шину адреса и данных. 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.*

Рассмотрим возможные способы интеллектуализации мехатронных модулей и подходы, направленные 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 реализовать систему управления на базе одного персонального компьютера очень сложно, а иногда и технически невозможно из-за проблем передачи сигналов и данных на большие расстояния.

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 кГц, для транзисторов MOSFET – 100 кГц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для IGBT предельное значение коммутируемого тока –

до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3500 В), малой мощностью 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.*

Создание интеллектуальных сенсоров – объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и компьютерной обработки по заданным алгоритмам в едином информационно-измерительном модуле. С точки зрения структуры 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), их обработки в реальном времени и передачи сигналов обратной связи в устройство компьютерного управления.

Типичными измеряемыми величинами, информация о которых используется при управлении мехатронными модулями и системами, являются: перемещение (линейное или угловое), скорость, ускорение и момент, развиваемый исполнительными двигателями; внешние усилия, действующие на рабочий орган (например, на шпиндель); положение и ориентация рабочего органа в пространстве (например, схвата промышленного робота или щупа контрольно-измерительной машины).

Проблема проектирования и технологии производства интеллектуальных сенсоров (ИС) является сложной научно-технической задачей. 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 энкодеры (абсолютные и инкрементальные) со встроенными микропроцессорами. Абсолютные энкодеры дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) движущегося вала относительно фиксированного нулевого положения. Преимуществами абсолютного энкодера являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, вполне достаточную для многих практических приложений.

Среди отличительных преимуществ современных энкодеров 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 абсолютные энкодеры выдают выходной сигнал в кодовой форме, что удобно для компьютерной обработки в реальном времени.

Интеллектуализация энкодеров 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 энкодеров заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

#### *Интеллектуальные мехатронные модули.*

Интеллектуальные мехатронные модули (ИММ) это третье поколение современных модулей движения. По сравнению с мехатронными модулями движения ИММ представляют собой конструктивно и функционально единый модуль включающий управляющие и электронные (силовые преобразователи) устройства, двигатели,

информационную и механическую часть. Это придает им интеллектуальные свойства и освобождает пользователя от решения проблемы интерфейса.

Для работы с интеллектуальными мехатронными модулями пользователю необходимо соединить ИММ с компьютером верхнего уровня управления через коммуникационную магистраль. В результате мы получим распределенную систему управления, структура которой приведена на рис. 5.35. Обмен информацией между устройствами осуществляется через компьютерную сеть, построенную по принципу общей шины.

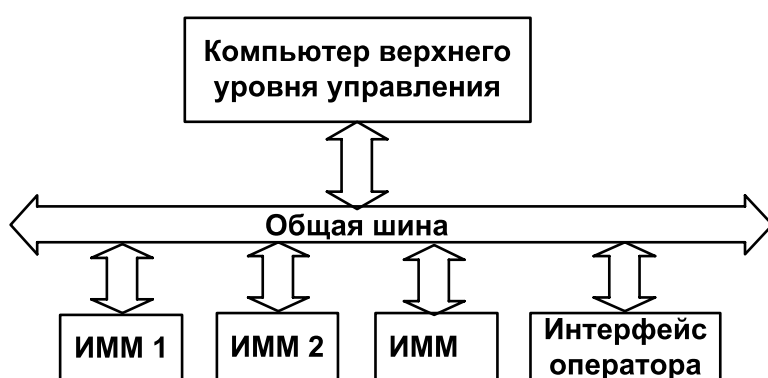


Рис. 5.35. Архитектура распределенной системы управления

Архитектура распределенных систем обладает следующими преимуществами:

- минимальное количество соединительных кабелей и проводов, что повышает надежность, удобство наладки и эксплуатации мехатронных систем;
- применение современных вычислительных алгоритмов и методов управления движением (нечеткая логика, нейронные сети);
- использование принципов открытой архитектуры, что позволяет изменять конфигурацию и расширять систему для решения новых задач функционирования;
- высокая надежность и робастность системы, возможность проведения диагностирования во время работы.

В качестве примера рассмотрим интеллектуальный мехатронный модуль «Milan Drive AUMA». Модуль применяется для децентрализованных систем автоматизации технологических процессов. В едином корпусе модуля конструктивно объединены синхронный

электродвигатель, электронные и информационные устройства, а также интерфейсные блоки, необходимые для создания распределенной мехатронной системы (рис. 5.36).

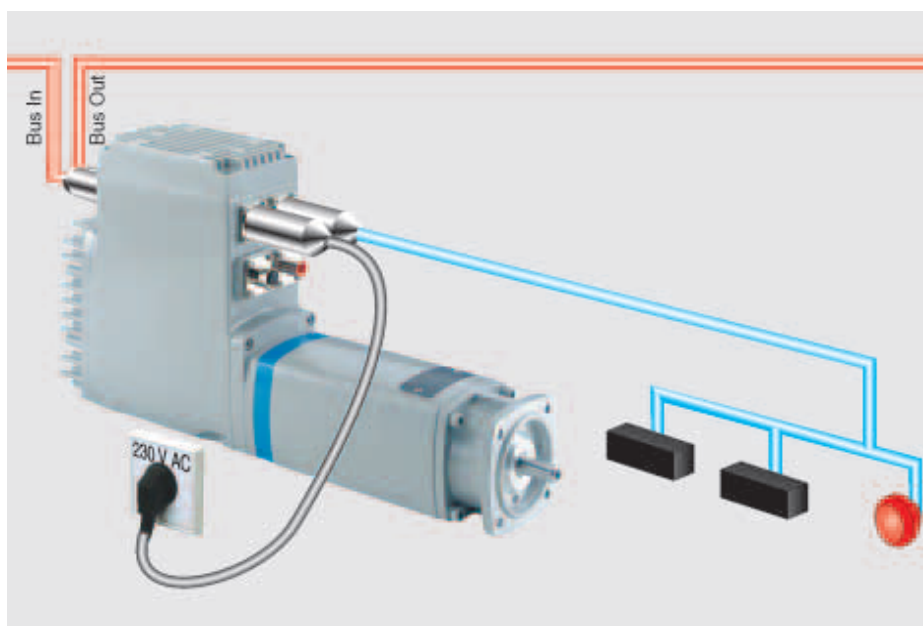


Рис. 5.36. ИММ «Milan Drive AUMA»

Блок электрических соединений обеспечивает подключение модуля к источнику питания, общей компьютерной шине, блоку входов/выходов и интерфейсу типа RS-232. Возможно подключение к интерфейсу Profibus-DP или CAN-Open. Программное обеспечение контроллера позволяет реализовать управление приводами, включая интерполяцию, и управление электроавтоматикой. В качестве датчика обратной связи по положению применяется вращающийся трансформатор. Некоторые модификации модуля содержат встроенное тормозное устройство.

Перспективным направлением является применение в интеллектуальных мехатронных модулях косвенных методов измерения параметров механического движения. В этом случае можно вообще отказаться от установки датчиков (даже встроенных), добиваясь минимальных габаритов и материалоемкости модуля. Величина скорости, положения, момента вычисляется компьютерным блоком по математическим моделям протекающих электромеханических процессов («виртуальные датчики»).

Хорошо известен способ косвенного определения момента, развиваемого двигателем постоянного тока, по величине тока в якор-

ной 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.

## **5.9 Микромехатронные устройства**

Одним из направлений развития и совершенствования техники является интеграция и миниатюризация оборудования. Примером этому являются электромеханика и мехатроника. Интеграция на кристалле элементов электроники, механики, информатики и измерительной техники привела к объединению этих технологий в конце 80-х – начале 90-х годов и созданию микросистемной техники и появлению микромехатронных устройств.

По размерам изделия разной степени миниатюризации принято классифицировать следующим образом:

- электромеханика и мехатроника –  $> 1$  мм;
- микросистемная техника или микромехатронные системы –  $1 \div 1000$  мкм;
- нанoeлектромеханические системы и нанотехнологии –  $1 \div 100$  нм.

Микромехатронные устройства могут быть определены как множество микроустройств разнообразных конструкций и назначения, производимых сходными методами с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники. В литературе для их обозначения также используется термин микроэлектромеханические системы (МЭМС).

Благодаря малым размерам микромехатронные устройства приобретают уникальные свойства, не характерные для макроскопических объектов в силу более высокого отношения площади поверхности к объему: повышенную чувствительность к статическому (поверхностному) электричеству и смачиваемость (действие сил поверхностного натяжения). Характерной их особенностью является синергетическое (взаимоусиливающие положительные свойства) взаимодействие электрических и механических связей.

Общая структура микромехатронного устройства идентична классической разомкнутой, при этом является интегрированной, включает в себя чувствительные элементы (датчики информации или сенсоры), каналы передачи энергии и информации, управляющие устройства, исполнительные механизмы (двигатели или актюаторы) и представлена на рис. 5.37.

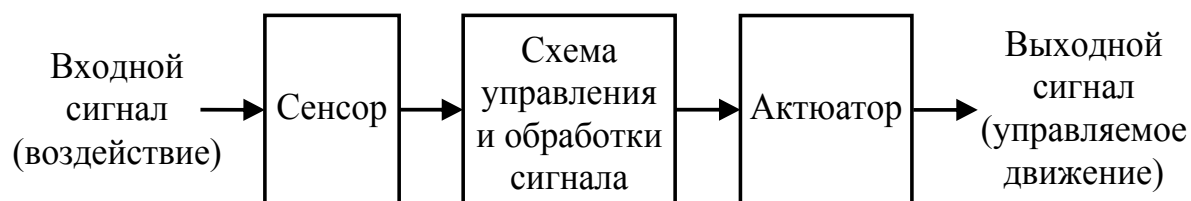


Рис. 5.37. Общая структура микромехатронного устройства

Типы датчиков: емкостные, пьезоэлектрические, тензорезистивные, терморезистивные, фотоэлектрические, на эффекте Холла.

Типы актюаторов: электростатические, термоэлектрические, пьезоэлектрические, гидравлические, пневматические, электромагнитные.

К микромехатронным устройствам относятся полупроводниковые датчики давления, микрофоны, акселерометры и гироскопы (датчики движения, активно используются в качестве чувствительных элементов при срабатывании подушек безопасности автомобилей, в антиблокировочных системах тормозов, планшетах, смартфонах).

Работа наиболее распространенных датчиков давления, движения основана на конденсаторном принципе (рис. 5.38 а) или пьезоэффекте (рис. 5.38 б). Подвижная часть системы – груз на подвесах. При наличии ускорения груз смещается относительно неподвижной части акселерометра. Обкладка конденсатора, прикрепленная к грузу, смещается относительно обкладки на неподвижной части. Изменение емкости пропорционально ускорению. В пьезоуст-

ройстве происходит давление грузика на пьезокристалл. Потенциал, вызванный деформацией пьезоэлемента, пропорционален ускорению.

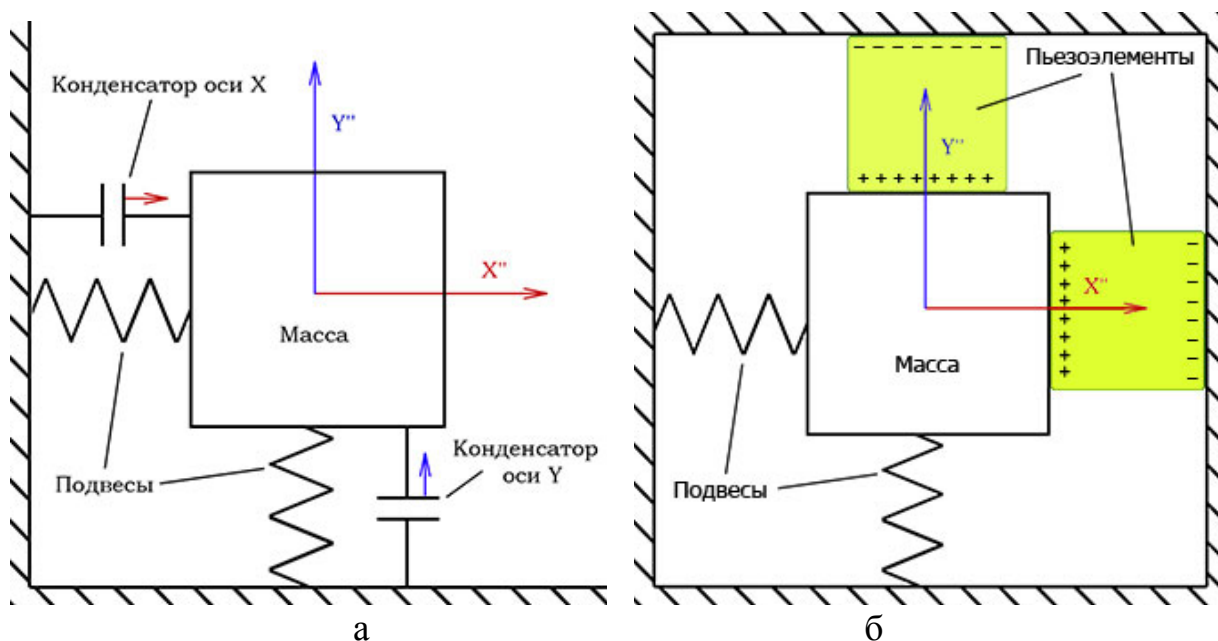


Рис. 5.38. Принцип работы емкостного (а) и пьезокристаллического (б) акселерометра

Внешний вид и конструкция механической части емкостного одноканального акселерометра приведены на рис. 5.39.

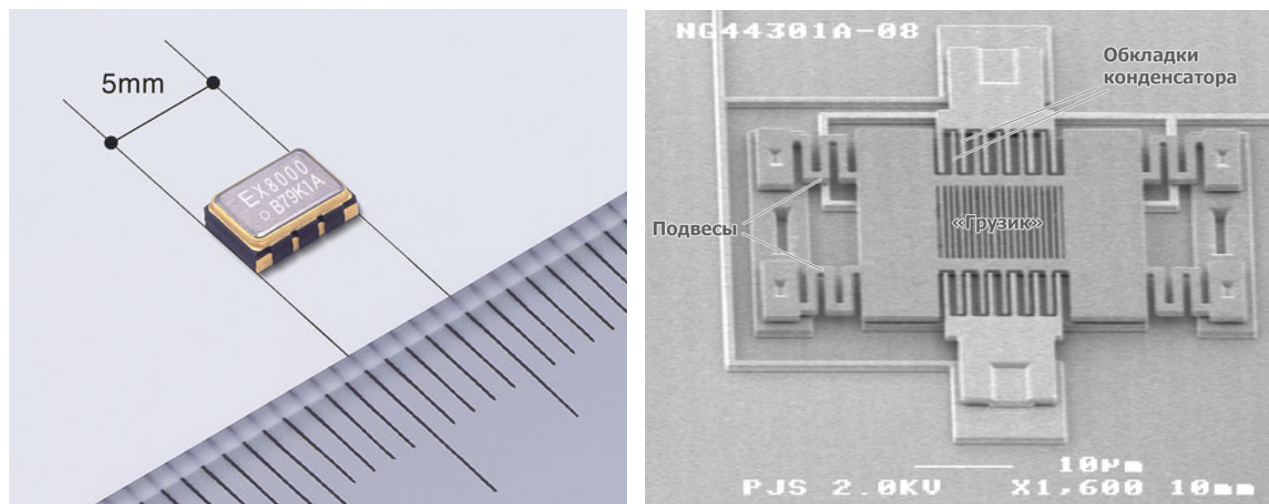


Рис. 5.39. Внешний вид и конструкция механической части емкостного акселерометра

Конструкция гироскопов (основа навигационных измерителей, систем стабилизации изображений) аналогична акселерометрам, но в них значения ускорений по осям пересчитываются в угловые



скорости. Распространены конструкции чувствительных элементов гироскопов, воспринимающих вращательное движение. Конструкция механической части такого гироскопа и внешний вид трехосного акселерометра на кремниевой основе с интегрированными интерфейсом и системой управления приведены на рис. 5.40.

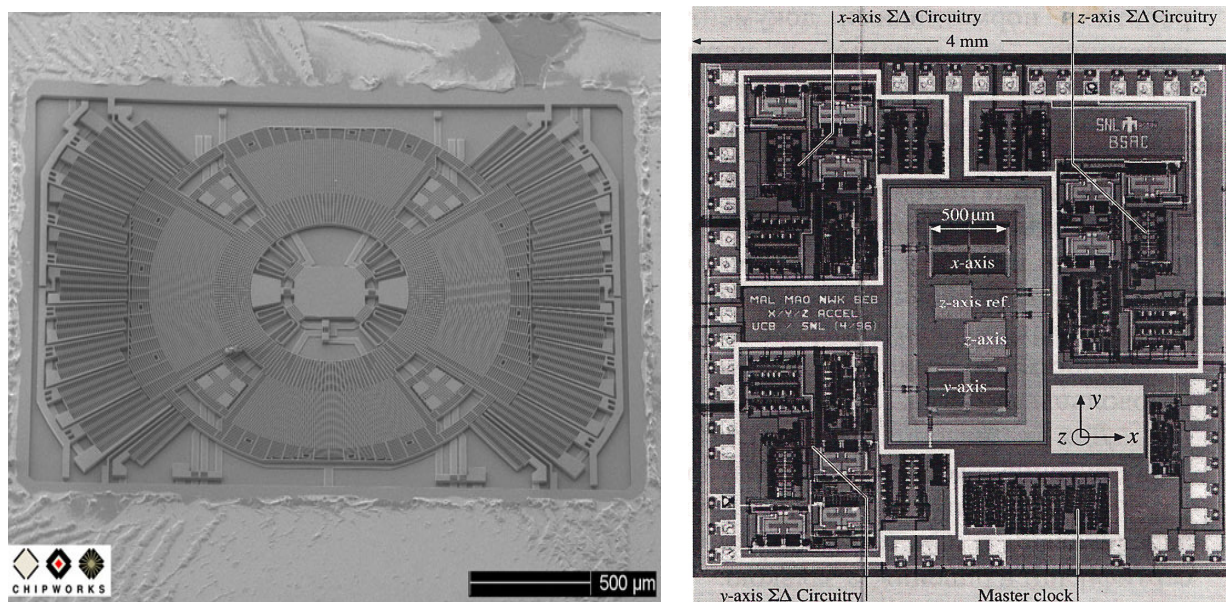


Рис. 5.40. Конструкция механической части гироскопа вращения и внешний вид трехосного акселерометра

Примером микромехатронных устройств с исполнительными механизмами являются проекторы (DLP – Digital Light Processing) на основе цифровых микрозеркальных устройств (DMD – Digital Micromirror Device), представляющих собой матрицу микрозеркал, количество элементов в которой равно разрешению итогового устройства (разработка компании Texas Instruments). Например, для разрешения  $1920 \times 1080$  – более 2 миллионов. Каждое микрозеркало представляет собой алюминиевую пластину размером порядка  $10 \times 10$  мкм (рис. 5.41).

Микрозеркало (рис. 5.42) размещено на площадке, которая прикреплена к более тонкой и более гибкой, чем прочие детали системы, полоске (подвесу), натянутой между опорами. В двух других углах основания, расположены электроды, которые за счет кулоновских сил могут притягивать один из краев зеркала. Таким образом, зеркало может отклоняться в обе стороны на угол до 12 градусов.

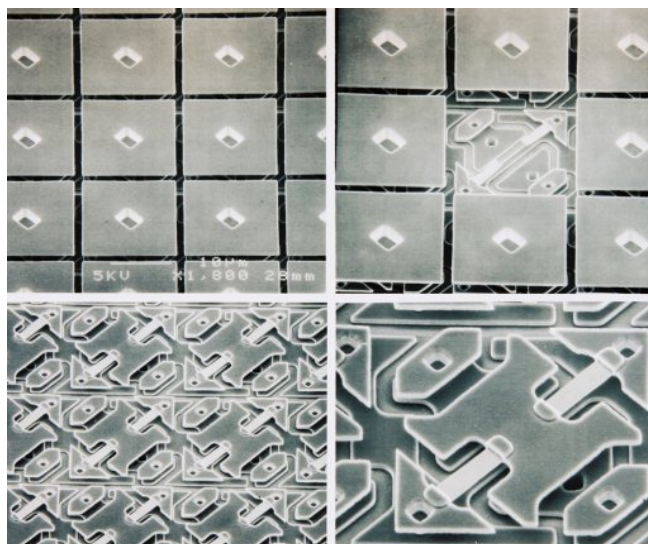


Рис. 5.41. Фрагмент матрицы микрозеркал

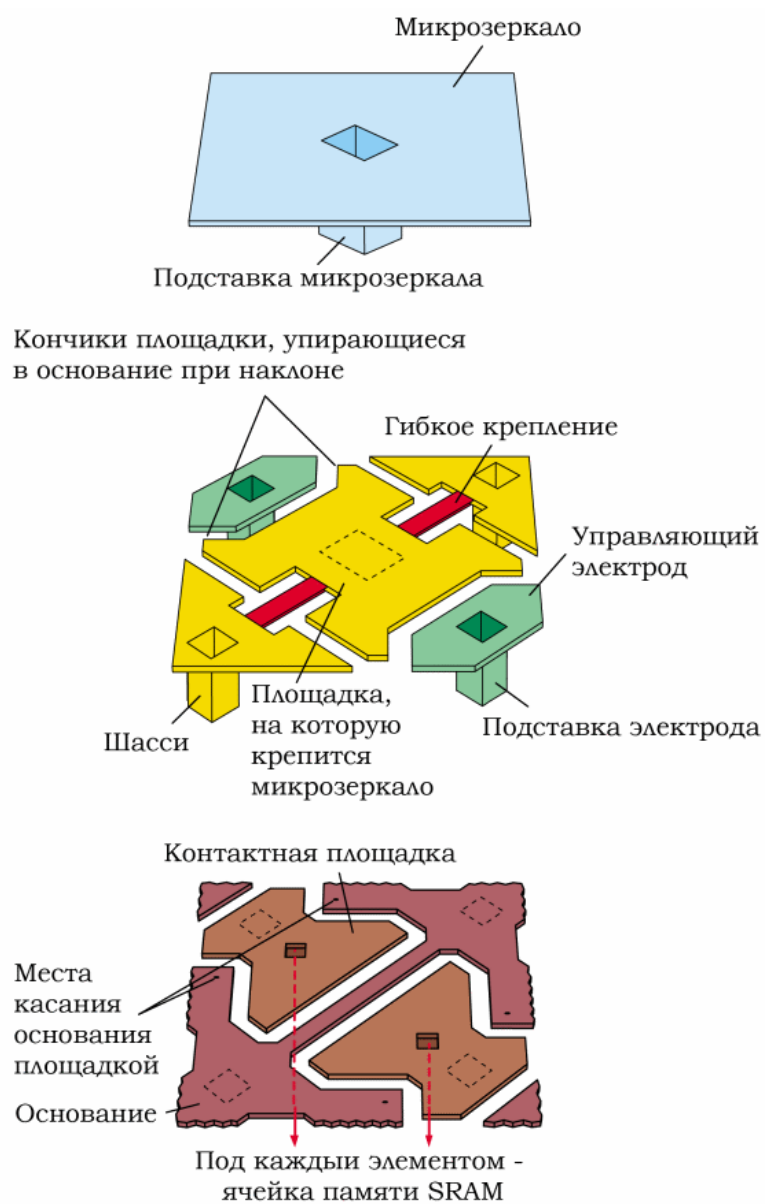


Рис. 5.42. Конструкция микрозеркального устройства



В одном из положений (рис. 5.43) зеркало отражает падающий на него свет в сторону линзы и далее на экран. В другом положении направляет световой поток в сторону, на теплоотвод. В первом случае на экране получается белая точка, во втором – черная. В результате работы всей матрицы создается изображение. Среднее положение зеркала занимают в состоянии, когда проектор выключен. Высокая частота колебаний зеркала (несколько кГц) позволяет обеспечить до 1024 градаций серого. Для добавления к изображению цветовой составляющей используется колесо со светофильтрами.

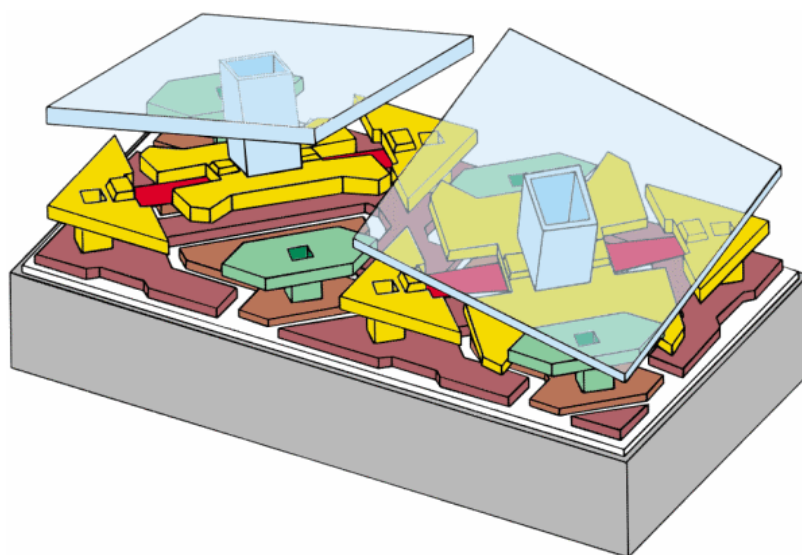


Рис. 5.43. Работа фрагмента микрозеркального устройства

Оптические микромехатронные устройства применяются для компенсации искажений в телескопах и микроскопах (адаптивные оптические системы – зеркала с изменяемой геометрией), а также в системах коммутации оптоволоконных сетей.

Другая область использования микромехатронных устройств – печатающие головки струйных принтеров. Современные принтеры оперируют с каплями краски объемом порядка пиколитра ( $10^{-12}$  л).

Печатающая головка представляет собой массив из множества микроотверстий. Под отверстиями – миниатюрные полости, в которые чернила поступают из основного резервуара картриджа. Сами собой чернила через дюзы не выливаются: диаметр отверстий настолько мал, что сила поверхностного натяжения не дает жидкости вытечь наружу. Краску необходимо выдавить принудительно. Для этого в микрополости (рис. 5.44 а) размещают пьезоэлемент, к которому прикладывается напряжение, вследствие чего кристалл

увеличивается в объеме и толкает мембрану, выталкивающую краску наружу. Такой метод использует компания Epson.

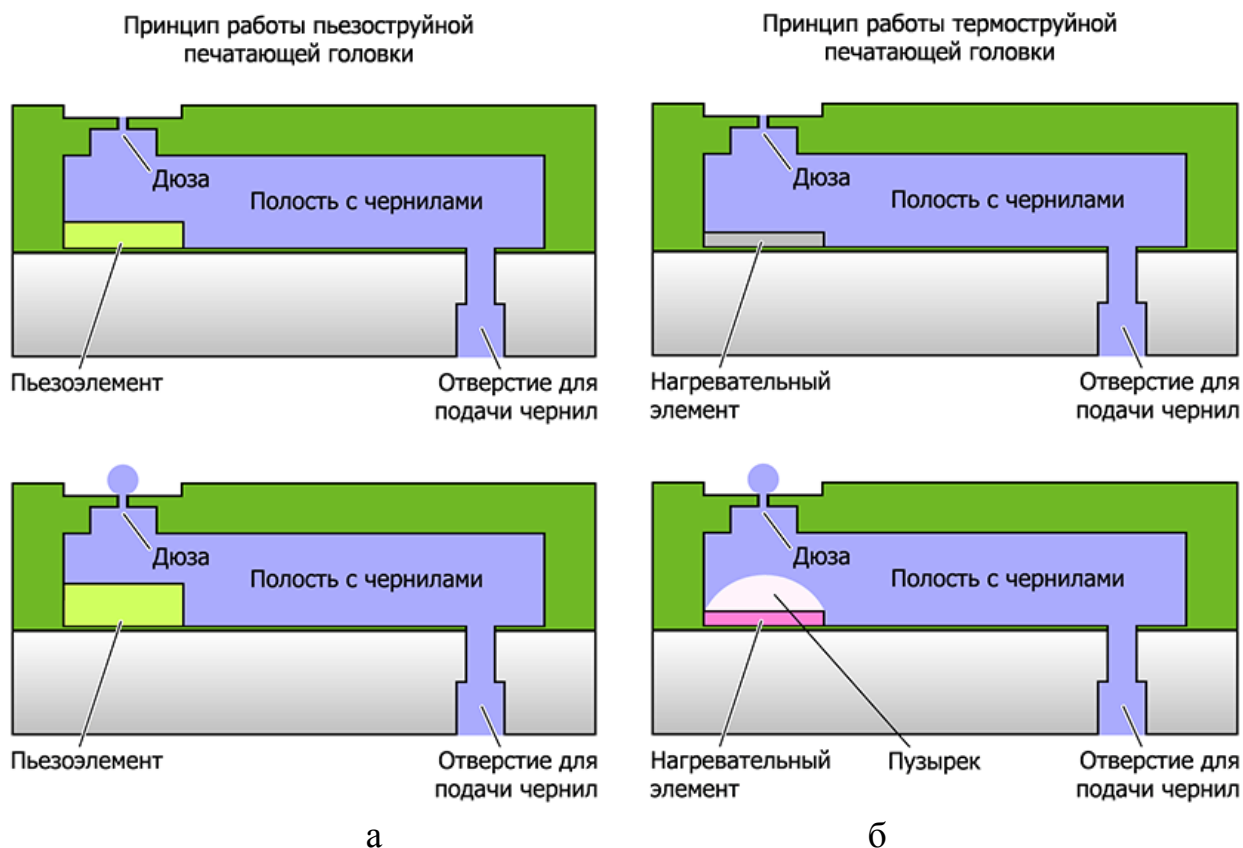


Рис. 5.44. Конструкции печатающих головок струйных принтеров

Более распространенный подход, который практикуют компании HP, Canon и Lexmark: термоструйная печать. В полости размещается нагревательный элемент (рис. 5.44 б), который мгновенно нагревает чернила до очень высокой температуры. Жидкость вскипает, увеличивается в объеме и выплескивается из полости на поверхность.

Технологии струйной печати также пригодны для изготовления объемных структур и используются в 3D-принтерах.

К области энергетики можно отнести разработку Массачусетского технологического института – микротурбину (рис. 5.45), разрабатываемую для замены литий-полимерных аккумуляторов для приложений, где требуется достичь минимальных размеров и максимальной удельной энергоемкости (до 500-700 Вт·ч/кг). Свойство обратимости микротурбины при доработке позволяет использовать ее в режиме насоса (рис. 5.45).

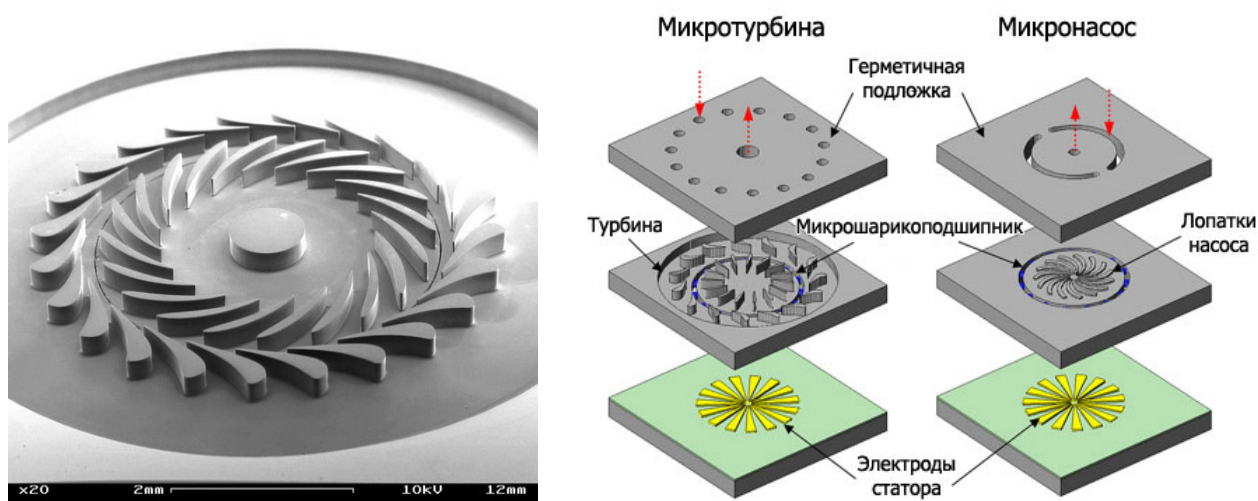


Рис. 5.45. Микротурбина и микронасос

Известен миниатюрный летательный аппарат с параметрами: масса – 80 г; размах крыльев – 15 см; высота полета – 230 м; скорость 70 км/час; время полета – 30 мин; радиус действия – 1,8 км; КПД двигателя – 82%; две видеокамеры весом 2 г; передача изображений до 2 км.

Самый миниатюрный подводный аппарат серии MicroHunter с дальностью действия 30 км, имеет длину 5 см и массу 5 г. Их системы управления обеспечивают эффективное применение достаточно большой группировки (более 50 микроаппаратов) для решения задач сбора трехмерной информации о подводных объектах.

Технологической базой микромехатронных устройств являются технологии микроэлектроники с возможностью создания трехмерных структур. При этом в традиционной полупроводниковой технологии кремниевая подложка используется еще и в качестве конструкционного материала для механических узлов.

Особенность микрокомпонент состоит в чрезвычайно малых расстояниях между проводниками, в необходимости тщательного учета механических и электрофизических свойств используемых материалов, в теснейшей связи трехмерной конструкции с технологическими возможностями ее изготовления, в необходимости учета множества параметров электродинамического взаимодействия близко расположенных узлов и проводников. Поэтому при их проектировании и моделировании велика роль специализированного программного обеспечения.

Наиболее известные программные пакеты проектирования микромехатронных устройств (COVENTOR, VelocceRF, ANSYS, SUGAR, FEMLAB, Momentum ADS, CST Microwave Studio) поддерживают ана-

лиз электростатических эффектов в двух- и трехмерной неоднородной среде с потерями, расчет термомеханических параметров и переходных процессов с учетом гистерезиса, тепловых деформаций, упругих эффектов; эффектов, связанных с упаковкой изделия в корпус; а также трехмерный электродинамический анализ полей в неоднородной среде с потерями. В пакеты обычно входит модуль разработки структурных и принципиальных схем, а также типовых радиоэлементов. Необходимы также библиотеки параметров материалов; редакторы послойного описания топологии двумерных подсистем и объединения их в трехмерную структуру; модуль визуализации результатов.

Микросистемная техника развивается на стыке множества отраслей науки и техники. Для оценки состояния и перспектив развития микромехатронных устройств и систем используется коэффициент  $K_{\text{TM}}$ , позволяющий оценить уровень их интеграции, и представляющий собой произведение числа транзисторов –  $T$  в изделии на число механических компонент –  $M$ . Для серийно выпускаемого акселерометра, изготавливаемого по технологии с топологическими нормами 2...10 мкм (содержащего 100...200 транзисторов и 1 механический элемент), получим  $K_{\text{TM}} = 10^2$ ; а для динамического управления поверхностью экрана дисплея (содержащего 1 млн. механических элементов экрана и 1 млн. управляющих транзисторов)  $K_{\text{TM}} = 10^{12}$ . В соответствии с этим критерием перспективными являются движущиеся системы, устройства памяти объемом 1 Тб/см<sup>2</sup>, оптомеханические дисплеи, системы распределенного управления конструкциями и др.

### **Вопросы для самопроверки**

**?**

1. Перечислите классификационные признаки мехатронных модулей по конструктивным признакам.
2. Приведите примеры преобразователей движения.
3. Область применения реечных передач.
4. Особенности применения планетарных передач.
5. Особенности применения волновых зубчатых передач.
6. Сравнительные отличия передач винт-гайка качения от винт-гайка скольжения.
8. Область применения дифференциальных и интегральных передач винт-гайка.
9. Какое предназначение направляющих и перечислите их виды?

10. Какой принцип действия тормозных устройств?
11. Какие есть механизмы для выборки люфтов в мехатронных устройствах?
12. Перечислите достоинства двигателя постоянного тока с постоянными магнитами.
13. Из каких материалов изготавливаются постоянные магниты для двигателей?
14. Объясните назначение электронного коммутатора в вентильном двигателе.
15. Назовите способ регулирования скорости шагового двигателя.
16. В каких механизмах применяются линейный двигатель?
17. Как обеспечивается регулирование выходного напряжения в схеме Ларионова?
18. Чему равно среднее значение напряжения на нагрузке в широтно-импульсном преобразователе?
19. Какие функции выполняет инвертор в ПЧ со звеном постоянного тока?
20. Запишите закон регулирования напряжения при изменении частоты ПЧ исходя из неизменной перегрузочной способности двигателя.
21. Укажите достоинства ПЧ с непосредственной связью с питающей сетью.
22. Назовите преимущества микропроцессорных систем управления.
23. Дайте классификацию микропроцессоров в соответствии с используемым набором команд.
24. Дайте классификацию микропроцессоров в соответствии с методами работы с памятью.
25. Приведите структуру микропроцессорного ядра.
26. Что представляют собой микроконтроллеры?
27. Что представляют собой цифровые сигнальные процессоры?
28. Классификация мехатронных модулей.
29. Сформулировать определения «модуль движения», «мехатронный модуль движения» и различия между ними.
30. Объяснить принцип действия модулей движения.
31. Состав мехатронного модуля движения
32. Структурная и функциональная схемы мехатронных модулей движения.

33. Что такое контроллеры движения?
34. Что такое интеллектуальные силовые модули?
35. Что такое интеллектуальные сенсоры?
36. Что такое интеллектуальные мехатронные модули?
37. Определение, структура и классификация микромехатронных устройств.
38. Области применения микромехатронных устройств.
39. Принципы функционирования распространенных микромехатронных устройств.
40. Оценка уровня интеграции микромехатронных систем.

### **Список литературы к разделу 5**



1. Анкудинов И.Г. Микропроцессорные системы. Архитектура и проектирование: учебное пособие / И.Г. Анкудинов. – С.Пб.: СЗТУ, 2003. – 109 с.
2. Бунтов В.Д., Макаров С.Б. Микропроцессорные системы. Часть II. Микропроцессоры: учебное пособие. – С.Пб.: Изд-во политехнического университета, 2008. – 199 с.
3. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
4. Готлиб Б.М. Введение в мехатронику: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного университета путей сообщения, 2007. – 782 с.
5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М.. Электроника. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
6. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учебное пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
7. Коськин Ю.П. Введение в электромехатронику. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1991. – 192 с.
8. Мальцев П.П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – М., 2005. – №1. – С. 9–10.
9. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
10. Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., Палагин В.А. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии. – Харьков: Коллегиум, 2007. – 324 с.

11. Никифоров В.О., Дроздов В.Н. Адаптивное управление мехатронным поворотным столом (Часть 1) // Мехатроника, автоматизация, управление. М., – 2002. – №4. – С. 18–21.
12. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособ. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
13. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – Київ: Либідь, 1993 – 432 с.
14. Справочник конструктора точного приборостроения / Под общ. ред. К.Н. Явленского, Б.П. Тимофеева, Е.Е. Чаадаевой. – Л.: Машиностроение, 1989. – 792 с.
15. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
16. Чурабо Д.Д. Детали и узлы приборов. Конструирование и расчет. Справочное пособие. – 4-е изд, испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
17. Alciatore D.G., Histan M.B. Introduction to mechatronics and measurment systems, 4th edition, McGraw Hill International edition, 2011. – 573 p.
18. Art of Electronics, Horowitz P. and Hill W., 2nd Edition, Cambridge University Press, 1989. – 1125 p.
19. Bhushan B. Handbook of nanotechnology. – Springer, 2007 – 1916 p.
20. Bolton W. Mechatronics – electronics control systems in mechanical and electrical engineering, 4th edition, Pearson Education Limited, 2008. – 648 p.
21. Design with Microprocessors for Mechanical Engineers, A.K. Stiffler, McGraw-Hill, 1992. – 496 p.
22. Elwenspoek, M., and R. Wiegerink, Mechanical Microsensors, Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 295 p.
23. Gad-el-Hak, M., The MEMS Handbook, CRC Press, 2002. – 1368 p.
24. Principles and Applications of Electrical Engineering, G. Rizzoni, 4th Edition, McGraw Hill, 2003. – 960 p.
25. The Art of Designing Embedded Systems, J. Ganssle, Newnes, 2000. – 256 p.

### **6.1 Датчики положения**

Все датчики, в том числе и датчики положения, преобразуют контролируемую величину в выходной электрический сигнал для дальнейшего измерения и преобразования. Преобразование, как правило, включает в себя: нормирование выходного сигнала, устранение помех, компенсация колебаний нулевой точки.

По виду выходной величины различают параметрические и генераторные датчики.

В параметрических датчиках контролируемая величина преобразуется в изменения таких параметров как активное сопротивление, индуктивность или емкость. Параметрические датчики требуют источник питания для выявления изменения контролируемой величины.

В генераторных датчиках изменения контролируемой величины преобразуется в изменения ЭДС на выходе датчика, а это не требует отдельного источника питания.

Одним из наиболее распространенных методов измерения перемещения и угла поворота, который используется в различных системах автоматики, является потенциометрический метод.

Изменения сопротивления достигается изменением подвижной щетки. Некоторые варианты схем потенциометрических датчиков приведены на рис. 6.1.

Регулируемый резистор  $R_p$  выполняется из проволоки, слоя полупроводника, металлической пленки.

Характеристики датчиков в зависимости от того как они включены реостатом или потенциометром выражаются зависимостями  $R(x)$  или  $U(x)$ , где  $R$  – выходное сопротивление,  $U$  – выходное напряжение,  $X$  – изменение щетки.

Потенциометры в зависимости от типа движения могут быть линейными либо угловыми.

При индуктивном методе измерения перемещения используется явление изменения магнитного поля индуктивности  $L$  в результате движения ферромагнитного сердечника.



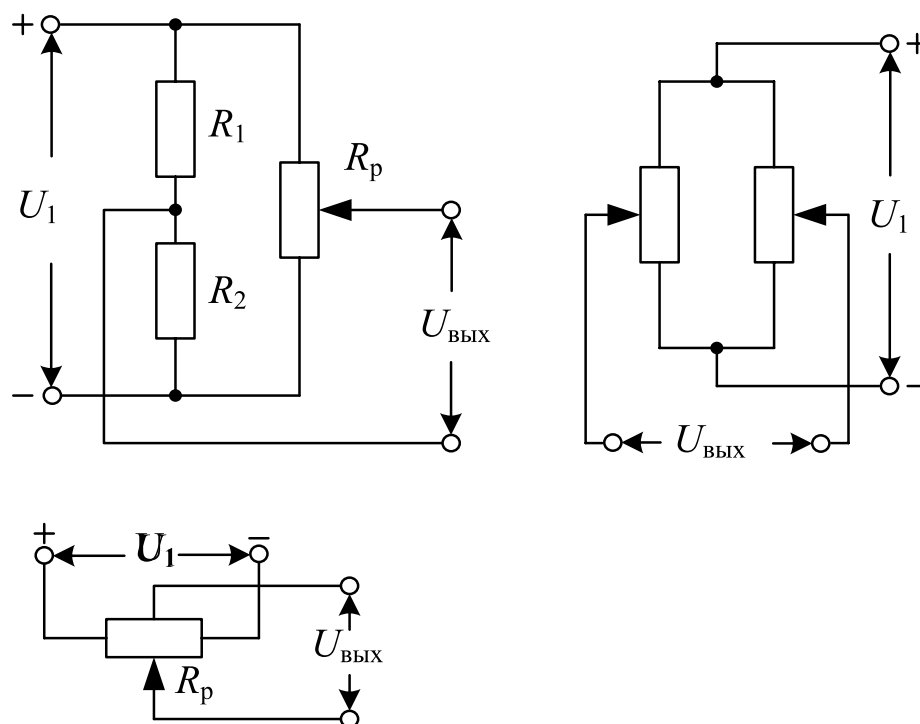


Рис. 6.1. Схемы потенциометрических датчиков

Чаще всего индуктивные датчики включаются в мостовые дифференциальные схемы, которые обеспечивают большое относительное изменение выходного сигнала и расширение линейной зоны характеристики, чем другие схемы включения. Схемы включения индуктивных датчиков приводятся на рис. 6.2.

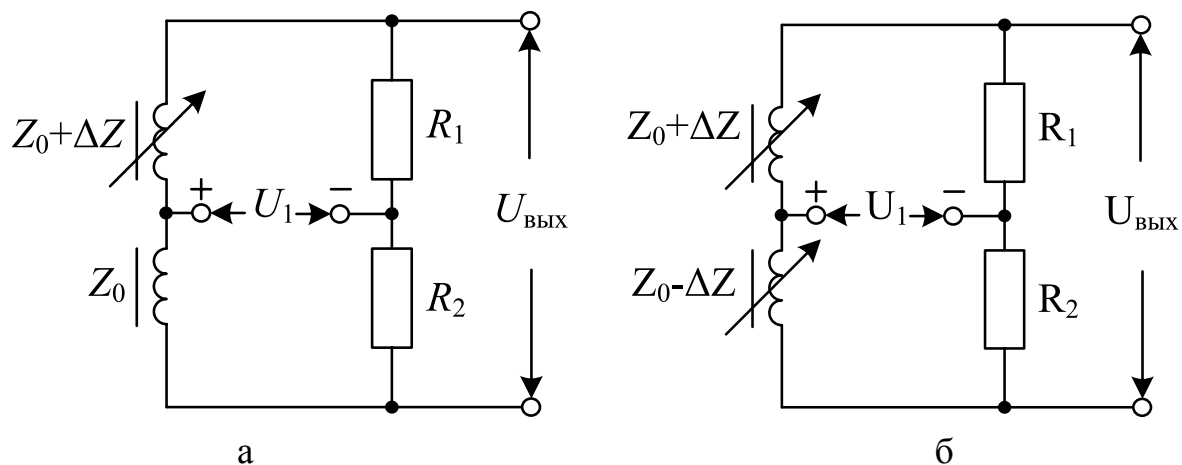


Рис. 6.2. Мостовая схема с одним регулируемым плечом (а), дифференциальная схема (б)

В этих схемах  $Z_0$  – полное сопротивление обмотки датчика в равновесном состоянии моста,  $\Delta Z$  – изменение сопротивления обмот-

ки датчика в результате перемещения  $X$ ,  $U_1$  – напряжение источника питания.

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  в зависимости от перемещения определяется характеристикой, показанной на рис. 6.3.

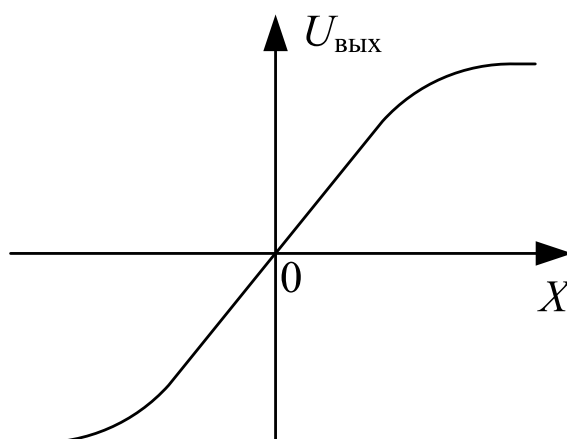


Рис. 6.3. Выходная характеристика

Индуктивные датчики могут быть использованы для измерения угловых и линейных (до 2 м) перемещений. Погрешность этих датчиков обусловлена в основном температурой и обычно составляет 0,1-1,5 %.

Указанные датчики весьма разнообразны по конструкции и широко используются в приводах металлорежущих станков, а также в приводах регулирующих органов ядерных реакторов.

В емкостных датчиках изменения перемещения преобразуется в изменение емкости конденсатора. При этом может измениться площадь пластин, расстояние между ними, может происходить замена одного диэлектрика другим, как показано на рис. 6.4.

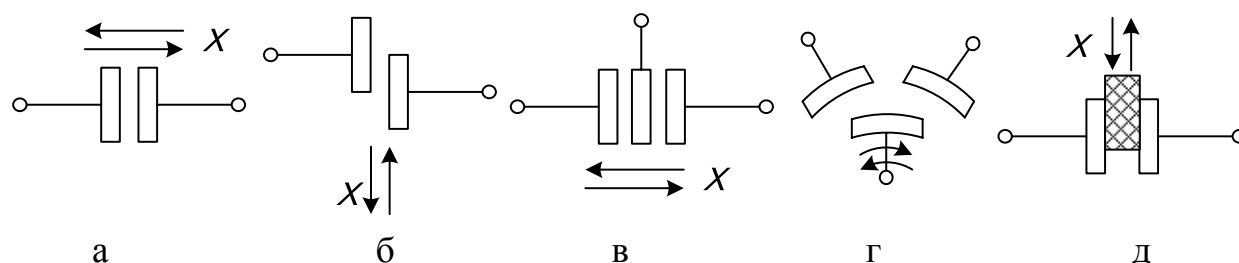


Рис. 6.4. Емкостные датчики

Для спрямления характеристики  $C(x)$  применяются дифференциальные датчики (рис. 6.4 в, г).

В различных системах автоматизации сигнал обратной связи по углу или управляющий сигнал в задающих устройствах формируется с помощью сельсина или вращающегося трансформатора.

Сельсин представляет собой микромашину переменного тока, который имеет две обмотки: однофазную (обмотку возбуждения) и трехфазную (обмотку синхронизации). Схема включения сельсина показана на рис. 6.5.

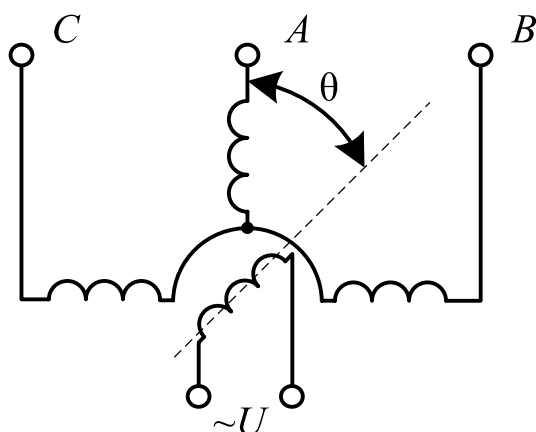


Рис. 6.5. Схема включения сельсина

Угол поворота ротора  $\Theta$  преобразуется в амплитуду или фазу выходного перемещения. В зависимости от использования той или другой координаты различают амплитудный режим, когда  $\varphi = \text{const}$ , а  $U_{\text{вых}} = f(\Theta)$ , и режим фазовращателя, когда  $U_{\text{вых}} = \text{const}$ ,  $\varphi = f(\Theta)$ .

В амплитудном режиме обмотки возбуждения получают питание от сети переменного тока и магнитный поток, действующий по осевой линии обмотки возбуждения, наводит соответствующие ЭДС в фазах обмотки сельсина.

Характеристика управления сельсина в амплитудном режиме приобретает синусоидальную зависимость как показано на рис. 6.6.

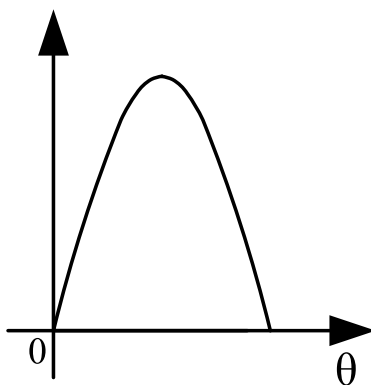
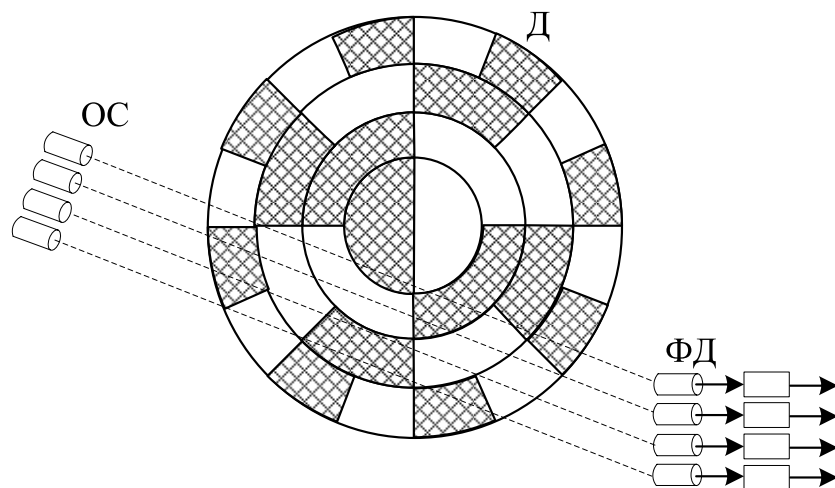


Рис. 6.6. Характеристика управления сельсина

Положительные значения ЭДС соответствуют  $\varphi = 0$ , а отрицательные  $\varphi = \pi$ . В режиме фазовращателя обмотки статора получают питание от источника трехфазного напряжения с неизменной амплитудой. В обмотке ротора, ось которой сдвинута на угол  $\Theta$  относительно начала отсчета, наводится ЭДС, имеющая сдвиг по фазе, равный  $\varphi$ .

В системах, в которых требуется более точное измерение угловой координаты, вместо сельсинов применяются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы). По своему устройству синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ) – двухфазная микромашина переменного тока. Неявнополюсный статор и ротор имеют по две взаимно перпендикулярные обмотки. СКВТ, как и сельсин, может работать в двух режимах: амплитудном и фазовращательном.

Для измерения углов в больших диапазонах и с высокой точностью используется дискретный датчик, выходной сигнал которых может быть представлен в виде двоичного кода (энкодеры). К таким датчикам относится фотоэлектрический датчик. Его схема показана на рис. 6.7.



Д – диск; ОС – осветители; ФД – фотодиоды; РЭ – релейный элемент

Рис. 6.7. Энкодер

Основным элементом фотоэлектрического датчика является диск, вал которого соединен с валом механического устройства. Диск разделен на несколько полей, количество которых соответствует количеству двоичных разрядов числа и определяет точность датчика.

На рисунке число разрядов равно 4. На практике используют 10 разрядов и более. В свою очередь каждое кольцо разделено на ряд прозрачных и непрозрачных частей. Внутреннее кольцо соответствует старшему разряду и разделено на две части. Внешнее кольцо разделено на восемь частей и соответствует младшему разряду.

Осветители, которые могут быть любого типа, в том числе и светодиоды, дают узкие параллельные пучки света, направленные на фотодиоды. Напряжение с фотодиодов поступает на релейные элементы и на их выходе формируется напряжение логической 1 или 0. Таким образом, каждому углу поворота диска соответствует свой код.

## **6.2 Датчики скорости**

Для измерения скорости можно использовать методы и датчики, позволяющие определять угловое или линейное перемещение описанные в п. 6.1. При этом для повышения помехозащищенности в ряде случаев осуществляется численное дифференцирование сигнала пройденного пути, основанное на измерение приращения пути на некотором временном интервале.

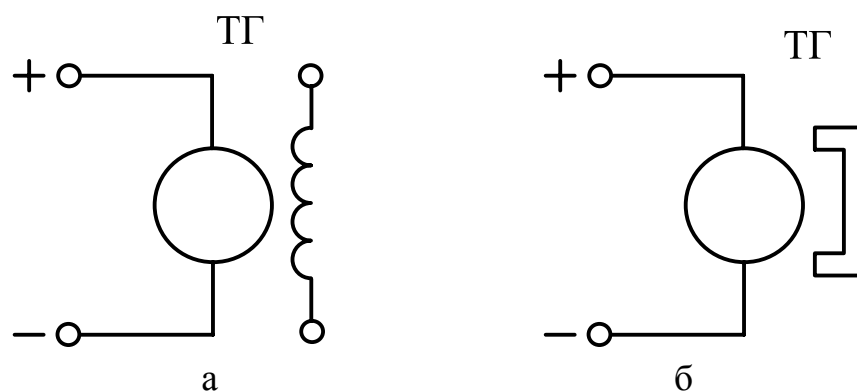
В то же время, использование закона электромагнитной индукции позволяет с помощью тахогенераторов измерять угловую скорость непосредственно, без дополнительных преобразований. Тахогенератор – это электрическая машина малой мощности, вырабатывающая электрический сигнал пропорциональный угловой скорости ротора.

Ко всем типам тахогенераторов предъявляются следующие требования:

- линейность зависимости ЭДС тахогенератора от скорости;
- минимальность пульсаций выходного напряжения;
- малый момент инерции и момент трения.

Тахогенераторы постоянного тока могут быть с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 6.8).

Тахогенераторы постоянного тока различают не только величину, но направление скорости, и поэтому находят применение в реверсивных и нереверсивных системах.



а – с независимым возбуждением; б – с постоянными магнитами

Рис. 6.8. Схемы включения тахогенератора

Тахогенераторы переменного тока выполнены на базе асинхронной двухфазной машины. На статоре машины имеется две взаимно перпендикулярные обмотки: обмотка возбуждения, расположенная по оси  $\alpha$  (фаза  $\alpha$ ) и выходная обмотка, расположенная по оси  $\beta$  (фаза  $\beta$ ), включенная на сопротивление нагрузка  $Z_H$ , как показано на рис. 6.9.

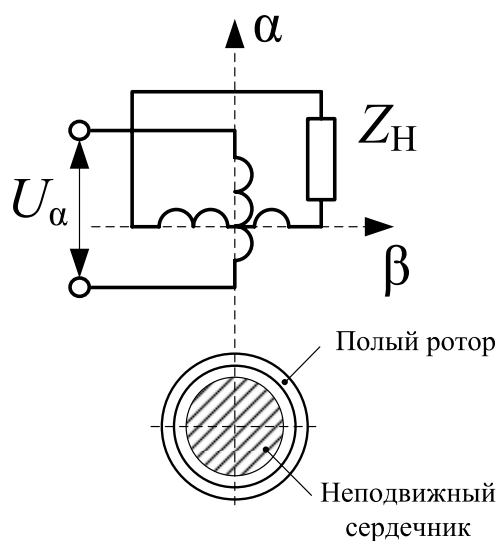


Рис. 6.9. Тахогенератор переменного тока

Для уменьшения момента инерции ротор выполняют тонкостенным в виде полого стакана из немагнитного материала (обычно алюминиевого сплава). Внутри ротора размещается неподвижный стальной шихтованный сердечник, по которому замыкается магнитный поток.

Амплитудная характеристика асинхронного тахогенератора приведена на рис. 6.10.

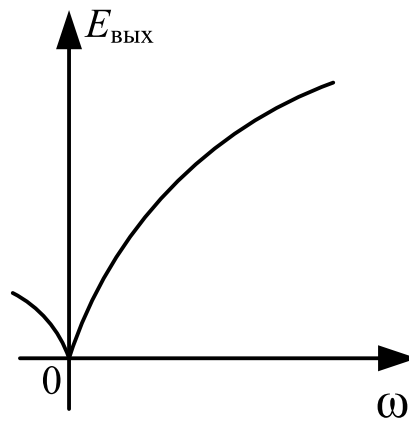


Рис. 6.10 – Амплитудная характеристика

Искажение данной характеристики обусловлено сопротивлением нагрузки. Поэтому на практике используют режим близкий к холостому ходу. Для реализации такого режима тахогенератор соединяют с нагрузкой через эмиттерный повторитель, обладающий высоким входным сопротивлением.

Полоса пропускания асинхронного тахогенератора ограничена частотой напряжения питающей сети. Поэтому для быстродействующих систем применяют повышенную частоту (400 Гц и выше).

В современных системах с большим диапазоном регулирования скорости и высокими требованиями стабилизации и точности, используют цифровые датчики скорости (ЦДС).

Функционально ЦДС содержит датчик импульсов, который преобразует угловую скорость в импульсы с частотой пропорциональной скорости и счетчик импульсов, формирующий на интервале измерения цифровой код, являющийся выходной величиной.

Датчик импульсов может быть выполнен на основе индуктосина или фотоэлектрического кодового диска. В любом случае датчик импульсов вырабатывает две серии импульсов, сдвинутых по фазе на  $\pi/2$ , которые используются для определения, как величины скорости, так и ее знака. Частота следования импульсов  $f$  находится как:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} N,$$

где  $\omega$  – угловая скорость,  $N$  – число импульсов (разрешающая способность датчика).

Формирование цифрового кода на выходе датчика скорости с помощью счетчика может выполняться двояко. В первом случае на заданном периоде измерения счетчик считает число импульсов, которые характеризуют среднее значение скорости. Во втором случае формирование индуктивного кода состоит в определении интервала времени между двумя импульсами, путем подсчета числа высокочастотных опорных импульсов, уместящихся на измеряемом интервале.

Рассмотренные варианты обеспечивают высокую точность измерения скорости, и тем большую, чем продолжительный период измерения.

### ***6.3 Датчики технологических параметров***

Датчики технологических параметров позволяют получить информацию о переменных мехатронной системы, которая участвует в том или ином технологическом процессе. К этим датчикам можно отнести датчик силы, момента, температуры, массы и другие.

Измерение силы заключается в уравнивании ее противодействующей силой таким образом, что тело, к которому оно приложено, остается в покое, и тогда результирующая сила равна нулю.

Датчик силы содержит чувствительный элемент, подвергающийся действию неизвестной силы. В этом элементе возникает деформация, которая порождает противодействующую силу. В зоне упругости деформация, в соответствии с законом Гука, пропорциональна силе.

В робототехнике, биомеханике с помощью датчиков силы измеряется вес тела. Эти измерения дают возможность определить массу тела (объекта), что имеет важнейшее значение, поскольку в ряде случаев позволяет исключить датчики расхода материала.

Деформация, а, следовательно, сила может быть измерена косвенно, если какое-либо из электрических свойств материала зависит от деформации (например, пьезоэффект).

Явление пьезоэффекта заключается в возникновении (или в изменении) электрической поляризации в некоторых диэлектриках таких как: кварц, турмалин, сульфат лития, специально обработанная керамика и т.п.



Если расположить пару обкладок на противоположных сторонах пьезоэлектрической пластины и приложить к ней силу, то на обкладках появятся заряды противоположных знаков, т.е. разность потенциалов, которая будет пропорциональна приложенной силе.

Такое конденсаторное устройство позволяет измерить силу, давление, ускорение.

За исключением кварца, известного своей стабильностью и твердостью, в датчиках обычно используется керамика как более дешевая, более удобная в обработке, обладающая достаточно высокой чувствительностью.

Схема формирования сигнала с электрическим зарядом на входе от пьезодатчика и пропорциональным ему напряжением на выходе показана на рис. 6.11.

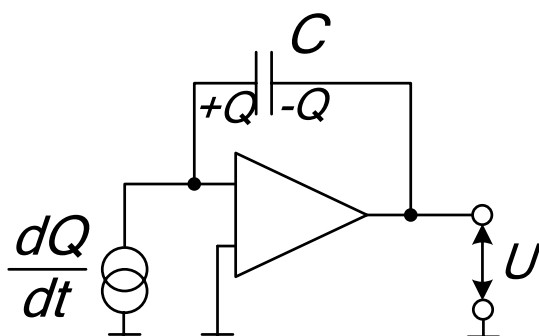
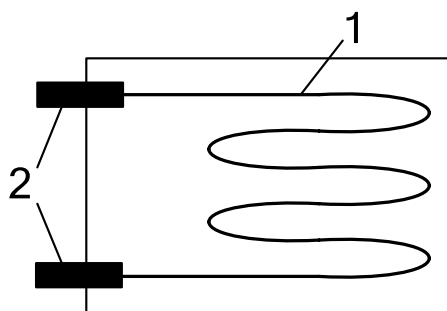


Рис. 6.11. Схема формирования сигнала с электрическим зарядом на входе от пьезодатчика

Наличие конденсатора обеспечивает полный разряд пьезодатчика при любом входном сопротивлении усилителя.

Часто на практике для измерения деформации используются достаточно простые тензодатчики. Работа тензодатчика основана на эффекте, при котором электрический проводник с высоким удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом при изменении длины изменяет свой электрическое сопротивление.

Тензодатчики наклеиваются на деформируемую поверхность так, чтобы прямолинейные участки проводника растягивались либо сужались в соответствии с деформацией детали. Конструкция распространенного тензодатчика спирального типа показана на рис. 6.12. Такие датчики совместно с тензоусилителями позволяют измерять малые механические деформации составляющие несколько микрон.



1 – проволочная спираль, 2 – контакты подвода

Рис. 6.12. Конструкция тензодатчика

При измерении момента, возникающего вследствие приложения силы к рычагу, существует проблема передачи информации с движущегося датчика в стационарную измерительную цепь. Эта связь может осуществляться контактным или бесконтактным путем. При контактной связи применяются скользящие контакты, либо погруженные в ртуть вращающиеся контакты. Очевидно, что рабочий ресурс таких датчиков ограничен ресурсом контактов. Поэтому в современных системах получила распространение бесконтактная связь. В этом случае для передачи электрического сигнала используется емкостная (вращающийся конденсатор) или индуктивная (вращающийся трансформатор) связь. Такой датчик состоит из передающей и принимающей частей. В передающей части, для измерения момента, может быть использован магнитострикционный измеритель. Его работа основана на явлении изменения магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитного материала в случае приложения к нему усилия. Так, например,  $\mu$  растет в области растяжения материала и убывает в области сжатия. Если на ферромагнитный цилиндрический стержень действует момент, ось которого совпадает с осью стержня, то возникающие напряжения определяют на его поверхности два взаимно перпендикулярных направления к оси цилиндра, вдоль которых изменение магнитных проницаемостей  $\mu_1$  и  $\mu_2$  максимально и противоположно по знаку. Для выявления этих изменений можно использовать сердечник крестообразной формы, показанный на рис. 6.13.

На сердечнике расположена первичная обмотка и две пары соединенных последовательно вторичных обмоток, включенных дифференциально, как показано на рис. 6.14.

Если момент отсутствует, то  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $U_2 = 0$ . При появлении момента эти условия не выполняются, т.е.  $\mu_1 \neq \mu_2$  и  $U_2 \neq 0$ .

Более высокой точностью измерения момента обладает датчик, использующий пьезоэффект или датчики индуктивного типа с измерением угла кручения.

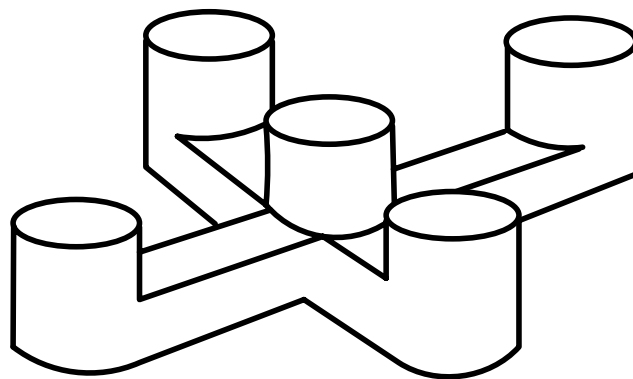


Рис. 6.13. Крестообразный сердечник

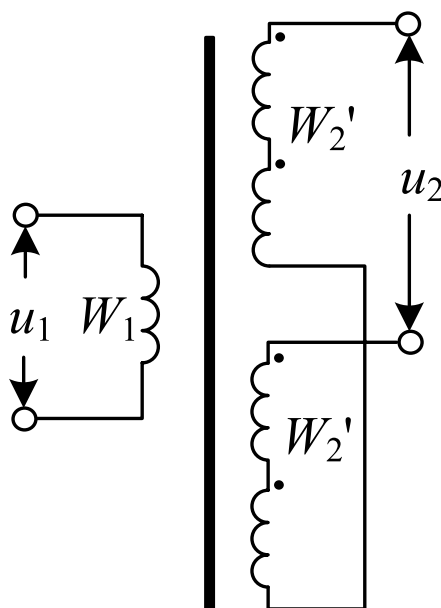


Рис. 6.14. Схема обмоток

Внедрение микропроцессорной техники позволяет перейти от процедуры измерения к процедуре вычисления момента. Если движущий момент создается двигателем постоянного тока, у которого магнитный поток – величина постоянная, то в этом случае момент пропорционален току, который легко определить с помощью датчика тока (в простейшем случае шунта).

Измерение потока двигателя возможно с помощью датчиков Холла, которые изготавливают из германия, сурьмянистого индия и других полупроводниковых материалов.

Кроме того, необходимо отметить, что момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату статорного напряжения, поэтому используются датчики напряжения (в простейшем случае делитель напряжения).

Развитие робототехники вызвало появление тактильных датчиков, воспроизводящих осязательные свойства человеческой кожи.

Тактильные датчики матричного типа дают целостное представление о форме предмета, поскольку каждая ячейка матрицы, есть не что иное, как микроэлектронный датчик силы или деформации, вырабатывающий электрический сигнал, позволяющий распознавать образ. Тактильные датчики на интегральных схемах с применением кремня, кварца и поликристаллической керамики могут обеспечить достаточно высокий диапазон измерений при относительно небольшой стоимости.

Наиболее часто измеряемой физической величиной различных технологических процессов является температура. Температура представляет собой важнейшую характеристику состояния вещества. Работоспособность любой системы ограничена некоторым диапазоном температур.

Для измерения температуры используют термодатчики. Их работа основана на способности проводников и полупроводников изменять удельное сопротивление под действием температуры.

В термодатчиках используют терморезисторы, представляющие собой резисторы с явно выраженной зависимостью  $R(T)$ . Обычно терморезисторы выполняются в виде цилиндров, таблеток, бусинок, на концах которых укрепляются электроды. В качестве полупроводников используют оксиды, сульфиды и нитриды металлов.

Температурная характеристика  $R(T)$  терморезистора имеет вид, показанный на рис. 6.15.

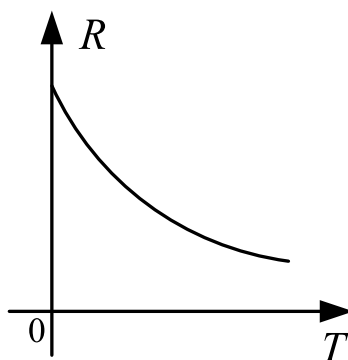


Рис. 6.15. Температурная характеристика  $R(T)$  терморезистора

Терморезисторы могут использоваться в качестве датчиков вакуума, скорости и направления потока жидкости или газа, поскольку в зависимости от этих параметров изменяется коэффициент теплоотдачи.

## **Вопросы для самопроверки**



1. Какие различия между параметрическими и генераторными типами датчиков?
2. Назовите особенности амплитудного и фазовращательного режима работы сельсина.
3. Что собой представляет резольвер?
4. Чем определяется разрешающая способность цифрового датчика скорости или угла поворота?
5. Перечислите основные типы датчиков технологических параметров.

## **Список литературы к разделу 6**



1. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2004. – 576 с.
2. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
3. Коробков Ю.С. Электромеханические аппараты автоматики / Ю.С. Коробко, В.Д. Флора. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 344 с.
4. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В.М. Терехов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.

### ***7.1 Постановки задачи управления мехатронными системами***

Рассмотрим задачи управления применительно к мехатронным системам, которые используются в производственных машинах и комплексах автоматизированного машиностроения и выполняют основные технологические функции. К таким системам управления предъявляются, как правило, весьма жесткие требования, так как режимы управления определяют ход технологического процесса и, следовательно, качество получаемого изделия. Задачи компьютерного управления технологическими машинами, которые не могли быть решены на базе традиционных подходов, стимулировали разработку и внедрение в практику принципиально новых методов управления.

В мехатронике ставится задача управления координированными функциональными (механическими) движениями машин.

Рассмотрим функциональную схему устройства с компьютерным управлением (рис. 7.1). Задача управления состоит в исполнении желаемого движения рабочего органа, который целенаправленно воздействует на объект работ. При этом со стороны внешней среды объект испытывает возмущающее воздействие. Следовательно, в общем случае объектом управления в мехатронике является сложная многосвязная система (при помощи интерфейсов И1–И7), в состав которой входят:

- блок исполнительных приводов;
- механическое устройство с рабочим органом;
- блок сенсоров (датчиков);
- объект работ, на который воздействует рабочий орган.

Отдельные блоки и устройства системы могут быть интегрированы в мехатронные модули (гл. 5). Процесс взаимодействия рабочего органа и внешних объектов (например, при выполнении операций сборки, механообработки и т. д.) позволяет организовать технологически ориентированный процесс управления, учитываю-

щий характер и специфику данного взаимодействия в конкретно поставленной задаче.

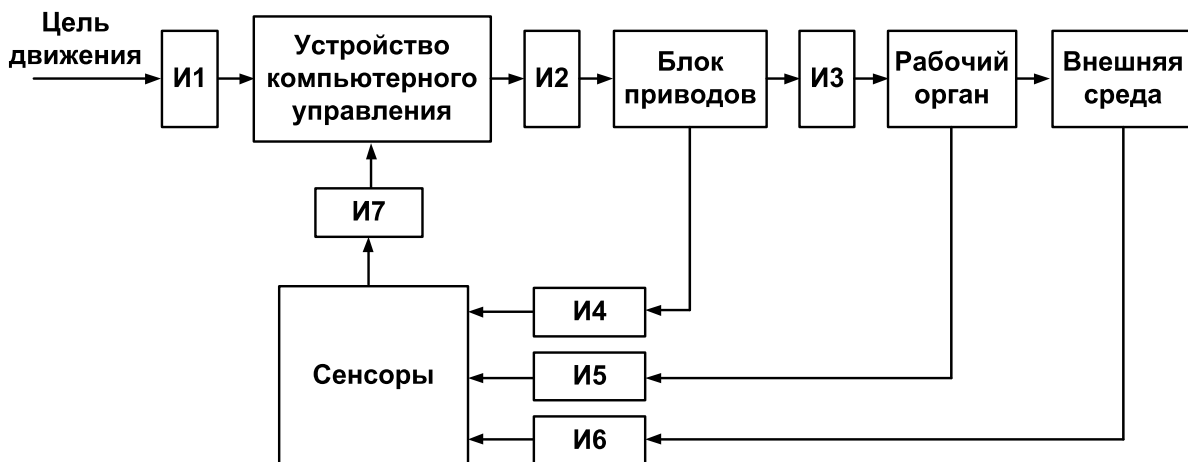


Рис. 7.1. Функциональная схема устройства с компьютерным управлением

Приведенная структура объекта управления определяет требования и постановку задачи управления мехатронными системами рассматриваемого класса. Воспроизведение заданных движений мехатронными модулями основывается на выполнении классических требований теории автоматического управления: устойчивости, точности и качества процесса управления.

Кроме того, необходимо дополнительно учитывать следующие специфические особенности мехатронных систем:

- движение рабочего органа, как правило, обеспечивается взаимосвязанными перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства;

- задача управления мехатронной системой должна быть решена в пространстве (найденны оптимизированные траектории движения всех звеньев, включая рабочий орган) и во времени (определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех приводов системы);

- параметры возмущающих воздействий, приложенных к рабочему органу и отдельным мехатронным модулям, для многих технологических задач заранее не определены;

- сложность построения адекватных математических моделей мехатронных систем (особенно многосвязных систем, включающих динамическую модель технологического процесса).

Размерность задачи управления в мехатронике определяется количеством независимо управляемых приводов системы. Мехатронные системы металлорежущих станков с ЧПУ, промышленных роботов и многих других объектов структурно являются многомерными и многосвязными системами. Для этих объектов задается желаемое движение рабочего органа, а реализуется оно совокупными перемещениями всех звеньев. Отсюда возникают специальные математические, алгоритмические и технические задачи управления.

Для планирования заданного движения мехатронной системы необходимо решить обратную задачу о положении механизма. Суть данной задачи состоит в определении требуемых перемещений звеньев системы по заданному движению рабочего органа.

Например, для манипулятора промышленного робота с шестью степенями подвижности постановка обратной задачи о положении рабочего органа сводится к следующему (рис. 7.2). По заданной траектории движения рабочего органа  $P$  необходимо рассчитать обобщенные координаты степеней подвижности  $q_1$ – $q_6$  манипулятора.

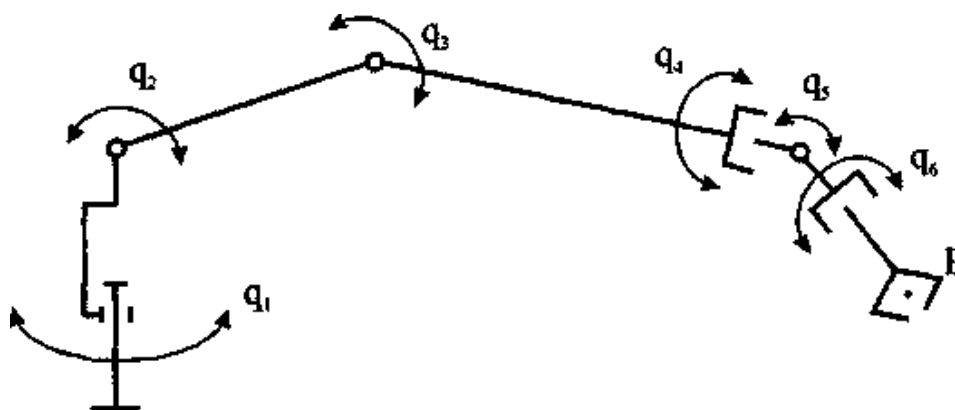


Рис. 7.2 – Обобщенные координаты манипулятора

При решении обратной задачи следует учитывать, что для определения обобщенных координат степеней подвижности необходимо решать систему из  $m$  алгебраических уравнений ( $m$  – число степеней свободы рабочего органа) с  $n$  неизвестными ( $n$  – число управляемых степеней подвижности механизма). Для манипуляционных механизмов с последовательным расположением кинематических пар решение обратной задачи о положении является проблемным, в то время как прямая задача решается относительно несложно. Для машин с параллельной кинематической структурой (например, станков-гексаподов) ситуация обратная.



Необходимо отметить, что исходная система уравнений является нелинейной. Это затрудняет решение обратной задачи в масштабе реального времени для многосвязных механизмов. Поэтому перспективными являются методы автоматизированного вывода и решения нелинейных уравнений или способы линеаризации исходных нелинейных систем. Эффективным способом, позволяющим «естественным» образом получить линейные уравнения, является переход от управления положением рабочего органа к управлению по скорости его движения. После дифференцирования исходной системы получаем систему линейных уравнений с переменными коэффициентами. При решении системы уравнений необходимо учитывать ограничения на обобщенные координаты и соответственно на размеры рабочей зоны и углы сервиса механизма.

Многосвязность системы означает, что движение каждого звена влияет на движение остальных звеньев. Указанное взаимовлияние происходит через механическое устройство как общую нагрузку, через общий источник энергии, а также вследствие естественных и искусственных динамических связей между каналами управления в блоке приводов. Следовательно, необходимо формировать управление движением мехатронной системы (особенно на высоких скоростях, где влияние динамических факторов существенно) с учетом перекрестных связей между звеньями.

Проблемным является также вопрос организации обратных связей при управлении многосвязными мехатронными системами. Технически наиболее просто устанавливать датчики положения и скорости в приводных модулях. Однако затем необходимо вычислить в реальном времени фактическое перемещение рабочего органа. Причем этот компьютерный расчет требует построения адекватной динамической модели системы с учетом весьма сложных для аналитической оценки факторов:

- всех действующих сил (управляющих моментов приводов, сил трения, внешних сил и моментов, центробежных и кориолисовых сил);

- первичных погрешностей системы (упругих деформаций звеньев, люфтов в механических передачах, погрешностей изготовления и сборки, узлов), которые определяют ее интегральные точностные характеристики;

- переменных параметров объекта управления (приведенных моментов инерции и масс механизма и нагрузки).

Поэтому наилучшим вариантом с точки зрения достоверности получаемой информации о фактическом движении является установка датчиков непосредственно на рабочий орган. Примерами такого подхода могут служить:

- применение систем технического зрения для определения положения рабочего органа и объектов в рабочей зоне (например, при сборке);

- установка силомоментных датчиков в запястье манипулятора для измерения действующих сил на операциях механообработки;

- использование блоков акселерометров для определения линейных ускорений рабочего органа при быстрых транспортных перемещениях.

Перспективным представляется также сочетание рассмотренных подходов при выборе обратных связей в сложных мехатронных системах.

Характерной особенностью мехатронных систем для автоматизированного машиностроения является возможность разделения задач программного управления движением на пространственную и временную. Это означает, что траектория перемещения рабочего органа в пространстве, и его контурная скорость могут планироваться раздельно с использованием различных критериев оптимизации. Оптимизацию закона движения технологической машины во времени обычно проводят по критериям производительности, точности обработки, а также по экономическим и комбинированным показателям.

## ***7.2 Иерархия управления в мехатронных системах***

Иерархическая структура – это многоуровневый набор взаимодействующих подсистем, каждая из которых ответственна за решение определенной задачи и имеет доступ к сенсорной информации, необходимой для решения задач управления данного уровня. В современных мехатронных системах, как правило, используется иерархия «сверху – вниз», когда нижний уровень полностью подчинен вышестоящим уровням.

Такая структура обеспечивает необходимую гибкость и многоплановость управления на каждом уровне иерархии и мехатронной

системы в целом. При такой организации управления изменение отдельных характеристик мехатронной системы приведет к изменению только некоторой части алгоритмов управления определенного уровня. При этом алгоритмическое обеспечение других уровней остается без изменений.

Рассмотрим иерархию управления, характерную для мехатронных (в частности, робототехнических) систем (рис. 7.3). В данной структуре выделяются четыре уровня управления: интеллектуальный, стратегический, тактический и исполнительный.

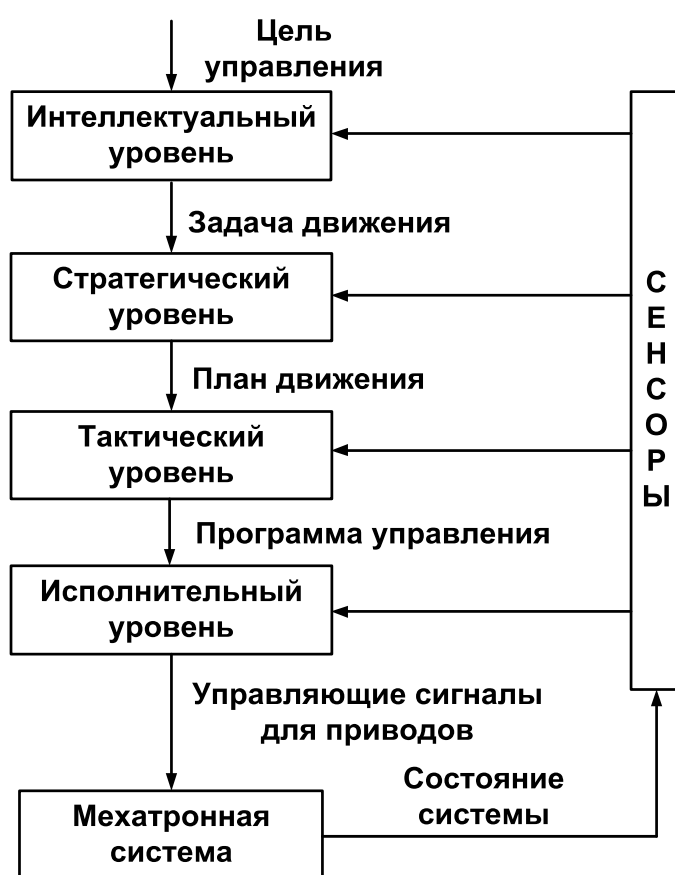


Рис. 7.3. Иерархия управления в мехатронных системах

Интеллектуальный уровень – высший уровень управления. Назначение этого уровня – принятие решений о движении механической системы в условиях неполной информации о внешней среде и объекте. Цель управления задается в крупном плане (например, взять заготовку со склада, передать ее на станок, обработать и проверить качество, передать на другой станок). Функции интеллектуального уровня в современных мехатронных системах обычно выполняет человек-оператор либо мощный компьютер верхнего уровня управ-

ления. ЭВМ на интеллектуальном уровне анализирует сложную изменяющуюся внешнюю обстановку, принимает решение о действиях, формирует последовательность выполнения элементарных задач и передает их на стратегический уровень управления. Таким образом, ЭВМ сама планирует свои действия на основе анализа внешней обстановки.

Система управления на интеллектуальном уровне решает задачи восприятия и распознавания обстановки, автоматического принятия решений в условиях изменяющейся обстановки, а также накопления опыта работы и самообучения (рис. 7.4).

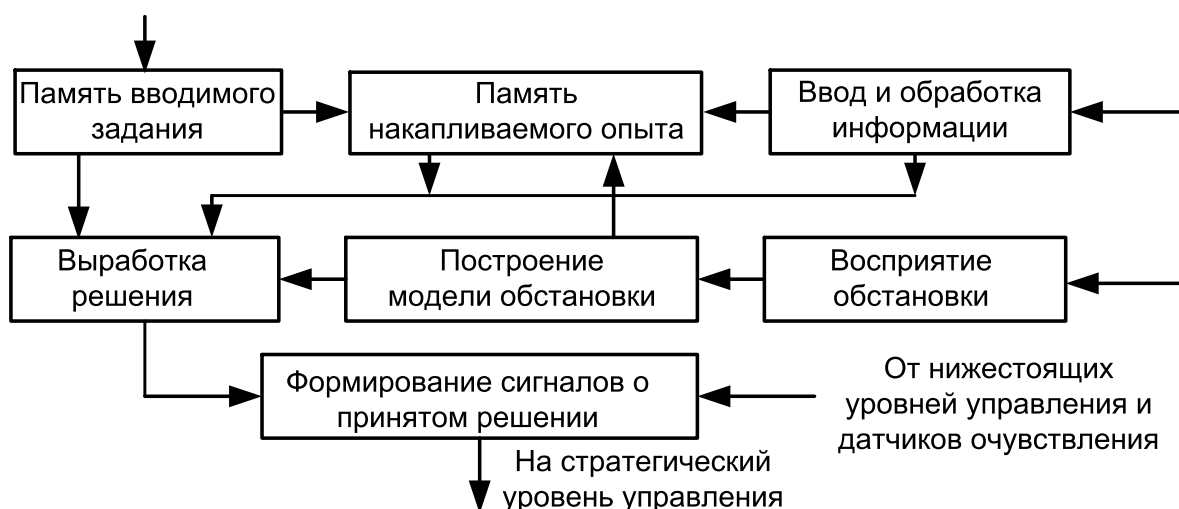


Рис. 7.4. Структура системы управления интеллектуального уровня

Стратегический уровень управления предназначен для планирования движений мехатронной системы. Планирование движений предполагает разбиение задачи движения, поставленной интеллектуальным уровнем, на последовательность согласованных во времени элементарных действий и формализацию целей управления для каждого из этих действий.

Примерами элементарных действий мобильного робота может служить:

- вывод рабочего органа в заданную позицию;
- захват предмета;
- тестовое движение для определения сил реакции со стороны объекта;
- перемещение объекта и возвращение робота в исходную позицию.

Формализация целей управления означает, что для каждого из элементарных действий должны быть записаны математические соотношения, выполнение которых обеспечивает успешное выполнение действия. Для технологических роботов на стратегическом уровне решается задача геометрического планирования движения рабочего органа.

При формализации целей управления для мехатронных систем необходимо учитывать:

- цель управления может быть формализована неоднозначно;
- форма модели может быть различна (алгебраические и дифференциальные векторные уравнения, система неравенств);
- выбор способа формализации субъективен и зависит от опыта разработчика и его видения постановки задачи.

Сенсоры интеллектуального и стратегического уровней (система очувствления) должны соответствовать органам чувств человека (для интеллектуальных роботов это техническое зрение, тактильное и силомоментное очувствление, устройства анализа звуковых и ультразвуковых сигналов).

Стратегический уровень выдает информацию о плане движения и целях управления в форме команд управления движением. Важно подчеркнуть, что структура и синтаксис проблемно-ориентированных языков управления движением существенно отличаются от универсальных языков программирования, хотя некоторые операторы могут совпадать.

Тактический уровень выполняет преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы).

Например, для выполнения команды позиционного управления движением манипулятора на тактическом уровне необходимо определить обобщенные координаты манипулятора, которые соответствуют желаемым декартовым координатам характеристической точки схвата. Для этого должна быть решена обратная задача о положении манипулятора в заданной точке траектории движения.

Соответственно, для управления скоростью движения программа управления строится как результат решения обратной задачи о скорости рабочего органа. Для реализации данных алгоритмов

устройство компьютерного управления должно выполнять в реальном времени следующие основные функции:

- прием информации от стратегического уровня в форме команд управления движением;
- прием и обработку информации от датчиков положения манипулятора о текущей конфигурации;
- расчет значений обобщенных координат и их производных;
- выдача управляющей программы на исполнительный уровень.

На решение обратной задачи расходуется значительная часть машинного времени, поэтому обычно она решается только в опорных точках траектории движения. При этом на тактический уровень ложится задача интерполяции траектории движения между опорными точками.

Исполнительный уровень управления предназначен для расчета и выдачи управляющих сигналов на блок приводов мехатронной системы в соответствии с программой управления и с учетом технических характеристик силовых преобразователей.

Для иерархических систем управления в мехатронике справедлив следующий принцип: по мере продвижения от высших уровней управления к более низким понижается интеллектуальность системы, но повышается ее точность. При этом под «интеллектуальностью» понимается способность системы приобретать специальные знания, позволяющие уточнить поставленную задачу и определить пути ее решения.

### ***7.3 Системы управления исполнительного, тактического и стратегического уровней***

#### ***7.3.1 Системы управления исполнительного уровня***

Контроллеры движения, архитектура которых рассмотрена в гл. 5.8, согласно принятой иерархии управления движением мехатронных систем являются устройствами управления исполнительного уровня (рис. 7.3). Назначение устройства управления состоит в обеспечении заданных требований по устойчивости, точности и качеству переходных процессов в системе при достижении цели управления движением, которая поступает с тактического уровня управления. При этом необходимо учитывать специфику мехатронных объектов управления.

Структурная схема системы управления движением, реализуемая типовым контроллером, представлена на рис. 7.5. В состав системы входят пять основных регуляторов: регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС), регулятор момента или силы (РМ), регулятор прямой связи по скорости изменения управляющего воздействия (РПСС) и регулятор корректирующей связи по возмущающему воздействию  $f$  (РСВВ). Входными воздействиями для системы в зависимости от поставленной цели управления могут быть управляющие сигналы по положению  $q_z$ , скорости, либо по развиваемому усилию. В системе реализуется принцип замкнутого управления, что предусматривает наличие соответствующих обратных связей по фазовым координатам системы.

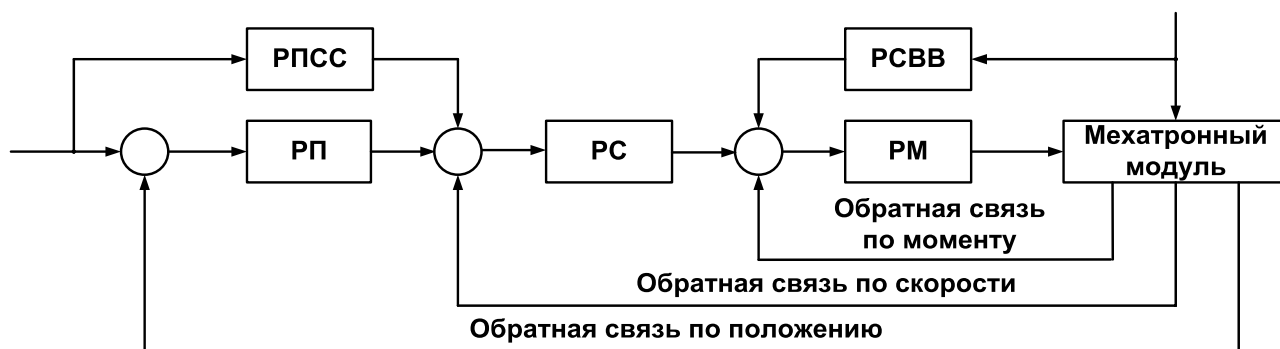


Рис. 7.5. Функциональная схема системы управления на исполнительном уровне

Для обеспечения заданных требований необходимо выполнить структурный и параметрический синтез регуляторов исполнительных приводов.

Традиционный подход предусматривает, что структура и коэффициенты усиления всех регуляторов и корректирующих устройств определяются при проектировании системы и далее остаются фиксированными в процессе ее эксплуатации. В современных системах управления вид и параметры регуляторов автоматически модифицируются в зависимости от цели конкретного движения и условий, в которых оно фактически осуществляется. Это позволяет адаптировать (приспособить) движение мехатронной системы к начальной неопределенности и изменяющимся условиям работы. Адаптация по существу есть оптимизация в условиях недостаточной априорной информации.

Адаптивная настройка регуляторов необходима, если введенные отрицательные обратные связи в исполнительных приводах не способны компенсировать влияние возмущающих воздействий и изменения параметров (и, возможно, структуры) объекта управления, которые вызывают недопустимое снижение показателей качества управляемого движения. Адаптивные системы управления по сравнению с традиционными имеют существенно более сложную структуру и техническую реализацию. Поэтому их проектирование требует решения целого ряда теоретических проблем управления и решение о применении адаптивного регулятора должно быть технически и технологически обосновано.

Задача построения адаптивного управления мехатронной системой включает в себя три основных раздела: создание сенсорных устройств, обработка информации сенсоров и синтез адаптивных законов управления.

Сенсорные устройства выполняют роль технических органов чувств и необходимы для решения двух основных задач:

- повышение точности работы мехатронной системы;
- обеспечение автономности функционирования в изменяющихся условиях работы.

Для решения указанных задач мехатронная система оснащается датчиками двух типов:

- датчики измерения положения, скорости и ускорения самой мехатронной системы;
- датчики измерения состояния окружающей среды.

С позиций адаптивного управления наибольший интерес представляют датчики второго типа. Они делятся на три больших группы:

- сенсоры геометрических свойств, выполняющие функции ограничения движения (тактильные датчики) и определения расстояния до окружающих предметов и их размеров (системы технического зрения, локационные системы);
- сенсоры физических свойств, выполняющие функции измерения усилий и моментов, плотности и давления, температуры, цвета и запаха;
- сенсоры химических свойств.

### *7.3.2 Системы управления тактического уровня*

Рассмотрим построение системы управления тактического уровня для технологического робота, выполняющего операции механо-



обработки. Параметрический подход при постановке задачи для технологического робота предполагает одновременное управление перемещением рабочего органа по заданной траектории (кривая  $L$ ) и развиваемой в процессе движения силой (вектор  $P$ ), которая воздействует на объект работ (рис. 7.6). Таким образом, в системе должны сочетаться методы контурного и силового управления движением робота.

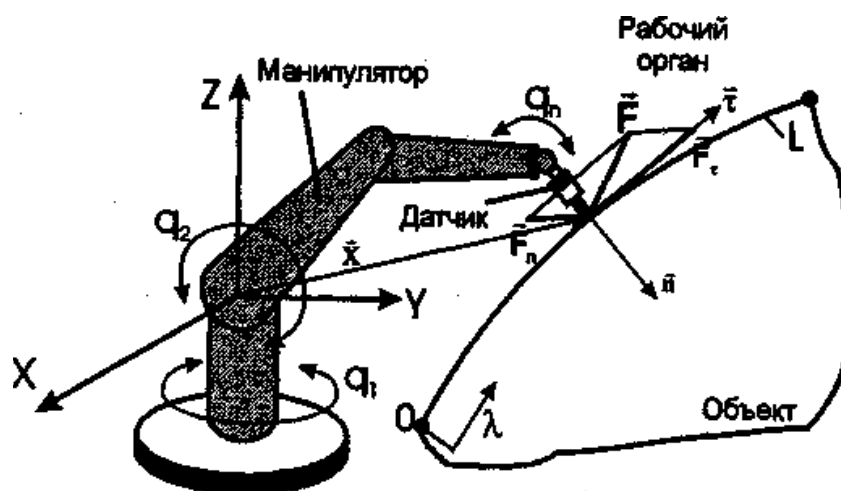


Рис. 7.6. Схема роботизированной механообработки

Робот при этом действует аналогично человеческой руке. Развивая определенные усилия в суставах руки, человек может перемещать в пространстве предметы, выполнять механическую работу. В то же время с помощью нервно-мышечной системы он воспринимает и обратные силовые воздействия со стороны объекта, что позволяет выполнять человеку многие сложные операции, (например, сборочные) даже вслепую.

Применение принципа двустороннего действия для технологических роботов требует учета их специфики как объекта автоматического управления, а также особенностей роботизированных технологических операций.

Контурную скорость робота для операции механообработки целесообразно регулировать в зависимости от величины внешнего силового воздействия. Это позволяет обеспечивать высокую производительность при изменении силы в широком диапазоне из-за переменных размеров и формы заусенцев, а также предупреждать силовые перегрузки исполнительной системы робота. Например, при

зачистке облоя на шасси видеоманитофона с помощью промышленного робота РМ-01 вследствие колебаний размеров заусенцев амплитуда силы резания колебалась в диапазоне (10–300%) от номинального значения.

На рис. 7.7 приведена блок-схема системы контурного силового управления, которая обеспечивает адаптацию движения робота к возмущающему силовому воздействию. Силомоментный датчик, установленный в запястье манипулятора, дает информацию о силах, действующих непосредственно на рабочий орган. Силовая обратная связь замыкает систему управления на тактическом уровне, что в сочетании с обратными связями в исполнительных приводах обеспечивает необходимую точность движения. Вычислитель контурной скорости служит для задания технологически рационального скоростного режима движения робота по заданной траектории.

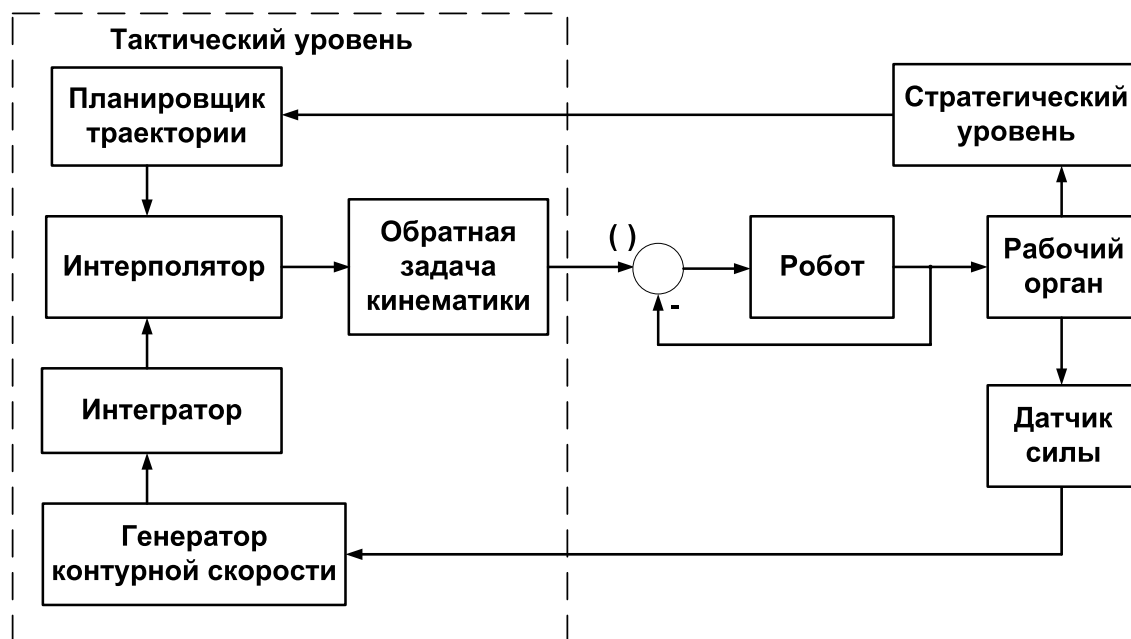


Рис. 7.7. Блок-схема контурного силового управления

Задачи интерполяции траектории движения и решения обратной задачи о положении выполняются управляющей ЭВМ в реальном масштабе времени. Результатом работы этих программ является формирование вектора обобщенных координат  $q_{pr}(t)$ , который определяет желаемые перемещения степеней подвижностей манипулятора.

Программная траектория ( $L$ ) рабочего органа определяется геометрическими характеристиками обрабатываемой поверхности и задается как параметрическая функция, аргументом которой является

не время  $t$ , как в традиционных системах автоматического управления, а путь (геометрическая переменная).

Таким образом, особенность параметрического подхода состоит в независимом задании траектории рабочего органа в пространстве и в адаптивном управлении его контурной скоростью во времени. Раздельное формирование законов управления движением мехатронной системы в пространстве и во времени позволяет использовать различные критерии при их оптимизации, что соответствует постановке задач управления мехатронными системами.

При этом движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается согласованными перемещениями всех исполнительных приводов и звеньев манипулятора.

Предлагаемый параметрический подход позволяет также учесть влияние рабочего процесса на движение робота при выполнении им технологической операции. При механообработке различают два вида технологических возмущений:

- погрешности, которые имеют систематический характер для конкретного изделия;
- случайные изменения технологических параметров.

Систематические погрешности в рассматриваемой системе учитываются на этапе программирования траектории  $L$ . Использование адаптивного регулятора позволяет компенсировать влияние отклонений технологических параметров, которые носят случайный характер. Таким образом, осуществляется сочетание коррекции траектории рабочего органа в пространстве (в режиме автономного программирования off-line) с адаптивным управлением контурной скоростью робота во времени (непосредственно в процессе движения мехатронной системы в режиме on-line).

Использование параметрического подхода позволяет свести задачу адаптивного управления многомерной нелинейной системой «технологический робот-рабочий процесс» к синтезу адаптивного управления скалярным параметром – контурной скоростью. Эта задача может быть решена в масштабе реального времени с использованием серийно выпускаемых микропроцессорных устройств управления.

### *7.3.3 Системы управления стратегического уровня*

Стратегический уровень управления предназначен для планирования движений мехатронной системы. Планирование движений заключается в разбиении входной информации (задачи движения) на

последовательность согласованных во времени элементарных действий (рис. 7.8).

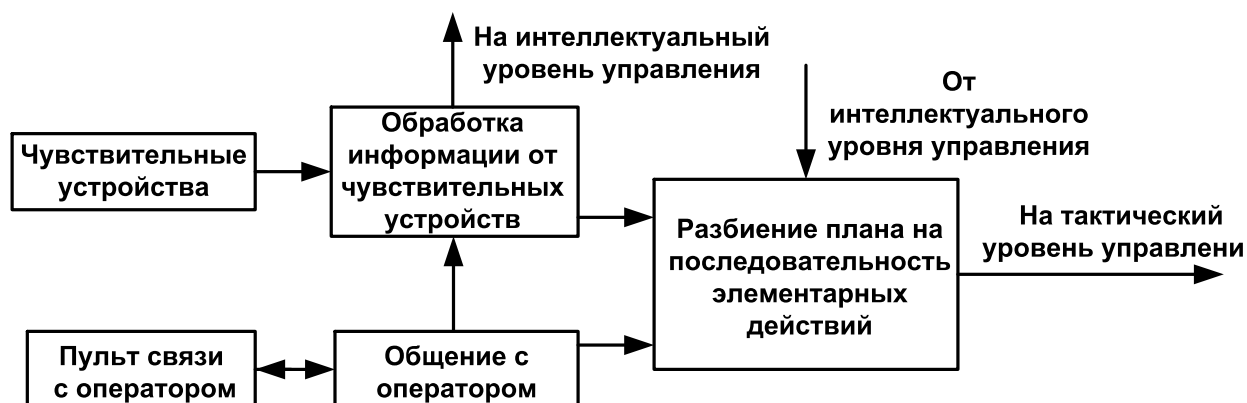


Рис. 7.8. Структура системы управления стратегического уровня

На стратегическом уровне управления осуществляется предварительная обработка информации от чувствительных сенсорных устройств и синтез функционально законченных действий. Алгоритмы стратегического уровня управления обеспечивают диалог с оператором и выполнение заданных инструкций. Информация от чувствительных устройств используется для коррекции плана выполнения операции при изменении условий функционирования мехатронной системы.

Система управления стратегического уровня выдает информацию о плане движения и целях управления в форме команд управления движением, которые поступают на тактический и (или) исполнительный уровни.

## 7.4 Интеллектуальные методы управления

В интеллектуальных мехатронных системах широко используются *интеллектуальные методы управления*.

Под *интеллектуальными* понимают методы, основанные на использовании аналогии с функционированием человеческого мозга. К ним относятся *метод нечеткой логики* и *метод нейронных сетей*.

Эти методы реализуются компьютерными устройствами – контроллерами и достаточно хорошо программно обеспечены, например, известными пакетами Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox из программного пакета MATLAB.

В настоящем пособии представляется целесообразным дать сведения о сущности этих методов на примерах применения в мехатронных устройствах исполнительного уровня как основы для их дальнейшего более углубленного изучения и использования.

#### *7.4.1 Метод нечеткой логики*

Метод нечеткой логики или фаззи-логики основывается на ассоциативном восприятии мозгом человека совокупности некоторых количественно определяемых явлений и выработке решений, исходя из этих восприятий.

Например, если человеку даже не указать значение температуры воздуха, но сказать «очень холодно», «тепло», «жарко», у него возникнет ассоциативное представление о ней. В результате он примет решение, в какой одежде выйти из дому.

Учитывая перевод данного пособия на английский язык, а также некоторую двусмысленность используемого в отечественной литературе определения «нечеткий регулятор», в дальнейшем употребляются термины: фаззи-логика, фаззи-управление, фаззи-регулятор.

Слово «fuzzy» переводится с английского языка как «нечеткий», «неясный», а в термине «метод фаззи-логики» оно означает, что этот метод при решении задач регулирования использует понятие нечетких множеств.

Хотя основные идеи фаззи-управления были высказаны ученым Л. Заде еще в 1965 г., практическая реализация фаззи систем началась в 90-х годах прошлого столетия, что было, в частности, обеспечено развитием микрокомпьютерной техники. Внедрение фаззи-систем управления происходило широко и стремительно, благодаря чему к настоящему времени они нашли применение от сложных систем вооружения до бытовой техники: видеокамер, холодильников, стиральных машин и др. Столь широкое и быстрое распространение фаззи-систем обусловлено рядом их важных достоинств:

- простота в разработке, не требующая специального математического аппарата (операторных преобразований, матричного исчисления и т.д.);
- малая стоимость фаззи-регулятора, представляющего собой небольшой процессорный блок и малые габариты;
- хорошая сопрягаемость с компьютерными устройствами более высокой иерархической ступени;

– возможность возложения на фаззи-контроллер дополнительных логических и программных функций.

В четких множествах, их величины  $x_i$  могут *принадлежать* либо *не принадлежать* множеству. Четкое множество, например,  $A$ , отображается записью

$$A\{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (7.1)$$

Это означает, что величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$  принадлежат множеству  $A$ , а  $y_1, y_2, \dots, y_n$  или  $x_{n+1}$  – не принадлежат.

В *нечетком множестве* элементы принадлежат ему с определенной *степенью принадлежности*. Нечеткое множество записывается как

$$A\{[x_1, \mu_1(x_1)], \dots, [x_n, \mu_n(x_n)]\}. \quad (7.2)$$

Это означает, что величина  $x_1$  принадлежит множеству  $A$  со степенью принадлежности  $\mu_1(x_1)$ ,  $x_n$  соответственно –  $\mu_n(x_n)$ . Степень принадлежности может изменяться в интервале от 0 до 1 или в процентах от 0 до 100%.

Поясним на примере. Говоря о молодежном возрасте человека, мы не всегда называем число его лет, а можем сказать «подросток», «юноша», «молодой человек». И хотя точное число лет не было названо, в нашем сознании возникает ассоциативный образ, соответствующий этим лингвистическим определениям. Но если совершенно ясно, что в 11 лет человек – «подросток», а в 19 – «юноша», то ясно и то, что человек не может, заснув подростком, проснуться юношей. Попробуем представить графически переход из подростка в юношу, приняв, что в 14 лет человек еще стопроцентно подросток, а в 18 лет уже стопроцентно юноша (рис. 7.9). На этом рисунке, исходя из жизненного опыта либо экспертных оценок, по оси абсцисс отложены годы человека, а по оси ординат степень принадлежности к тому или иному возрастному периоду. В данном примере лингвистические определения – «подросток», «юноша», «молодой человек» являются нечеткими множествами или *термами* (от англ. *term* – признак), к которым может относиться тот или иной возраст, выраженный в числе лет, и которые могут быть также отображены графически, как показано на рис. 7.9.

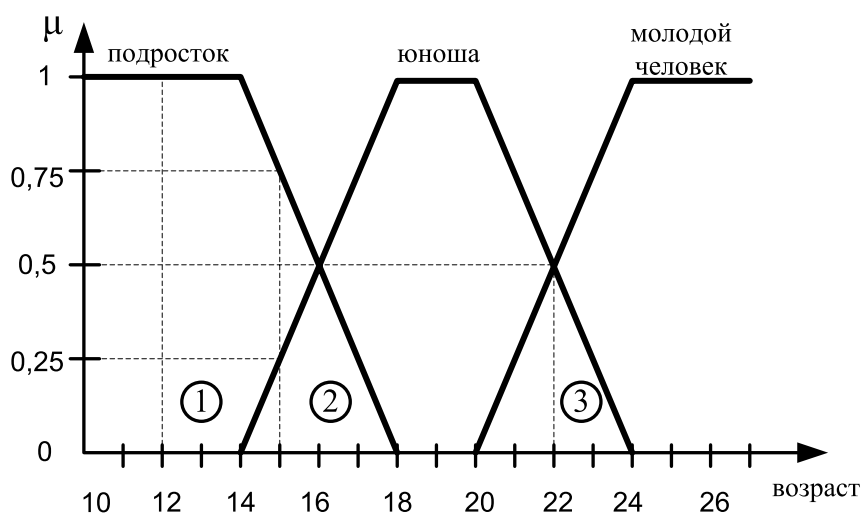


Рис. 7.9. Пояснение термина «нечеткое множество»

Рассмотрим три примера: 12 лет, 15 лет и 22 года. Очевидно, степени принадлежности для каждого из этих возрастов можно представить следующим образом:

12 лет –  $\{1; 0; 0\}$ ; 15 лет –  $\{0,75; 0,25; 0\}$ ; 22 года –  $\{0; 0,5; 0,5\}$ .

Это означает, что мальчик 12 лет относится к категории «подросток» со степенью принадлежности  $\mu = 1$ , к категории «юноша» с  $\mu = 0$  и к категории «молодой человек» с  $\mu = 0$ . Мальчик 15 лет к категории «подросток» принадлежит с  $\mu = 0,75$ , но уже с  $\mu = 0,25$  – к категории «юноша» и с  $\mu = 0$  – к категории «молодой человек». В свете вышеизложенного понятна запись и для возраста 22 года.

Переход к нечетким множествам позволяет при решении задач управления использовать принципы ассоциативного мышления, когда в процессе выработки выходного управляющего воздействия используются словесные (лингвистические) характеристики величин. Как показывает опыт, во многих случаях управление на основе методов фаззи-логики оказывается весьма эффективным. Простота в разработке, дешевизна, надежность и высокие показатели регулирования фаззи-систем определили быстрое их развитие и широкое распространение, и эта тенденция продолжает сохраняться.

Рассмотрим сущность фаззи-управления на примере регулирования скорости движения мехатронного модуля исполнительного уровня. В современных системах процедура фаззи-регулирования осуществляется обычно специальными компьютерными устрой-

вами – фаззи-контроллерами. Функционирование фаззи-регулятора (ФР) поясняет рис. 7.10. ФР в зависимости от отклонения текущего значения скорости от заданного должен выработать такой сигнал управления силовым электронным устройством (СЭУ), питающим электродвигатель, который обеспечит поддержание заданной скорости.



Рис. 7.10. Этапы обработки сигнала фаззи-регулятора

На вход фаззи-регулятора поступает предварительно вычисленное микропроцессором четкое значение сигнала рассогласования (относительное отклонение от заданной скорости)

$$U^* = \frac{U_3 - U_c}{U_3}, \quad (7.3)$$

где  $U_3$  – сигнал задания скорости.

Если скорость меньше заданной ( $U_c < U_3$ ), отклонение  $\Delta U_c$  положительно, если больше ( $U_{\text{вх}} > U_3$ ) – отрицательно.

Словесно (лингвистически) степень рассогласования можно охарактеризовать выражениями (термами) «малое», «среднее положительное», «большое положительное», «среднее отрицательное», «большое отрицательное».

Очевидно, логика управления должна быть такой: если скорость меньше заданной ( $\Delta U_c$  положительно), то ФР должен выработать сигнал на увеличение скорости электродвигателя (ЭД).

Если скорость больше заданной – на снижение.

Если же заданная и текущая скорости совпадают ( $U_{\text{вх}}=0$ ), сигнал на выходе ФР должен отсутствовать ( $U_{\text{вых}}=0$ ). При этом чем больше отклонение в ту или иную сторону, тем большим должно быть абсолютное значение  $U_{\text{вых}}$ .

При этом как на входе, так и на выходе фаззи-регулятора должны быть четкие количественные значения сигналов. Методы нечеткой логики используются в процессе преобразования инфор-



мации о скорости непосредственно в ФР. Этот процесс состоит из трех этапов: **фаззификации, логической обработки и дефаззификации.**

Уясним сущность каждого из этих этапов, осуществляя при этом для конкретности синтез фаззи-регулятора рассматриваемой системы.

*Фаззификация* – это процедура определения принадлежности значений входных сигналов к тем или иным нечетким лингвистическим переменным (термам) с последующим представлением информации об этих сигналах в понятной для компьютера форме.

На первом этапе фаззификации по правилам фаззи-логики производится *характеризация входной величины ФР* «входной фаззи-переменной», которой в нашем случае является сигнал рассогласования скорости. Первым шагом является установление *области определения входной фаззи-переменной*, т. е. нижнего и верхнего значения рассогласования скорости  $U_{\text{ВХ}}^*$ , в пределах которой будут лингвистически заданы термы, качественно характеризующие состояния входной фаззи-переменной. Установим, исходя из требований технологического процесса либо из опыта эти пределы, например,  $\pm 5\%$  или  $\pm 0,05$ . В соответствии с заданной логикой управления область определения входной фаззи-переменной «рассогласование скорости» разбиваем на 5 *нечетких диапазонов (термов)*: «малое», «среднее положительное», «большое положительное», «среднее отрицательное», «большое отрицательное».

Следующим весьма ответственным шагом является выбор *формы терма*. Обычно термы изображают в форме треугольников, трапеций и других кривых. *Форма терма* определяет степень принадлежности к нему значения фаззи-переменной, поэтому ее называют *функцией принадлежности*. Каждый терм должен иметь свои границы, которые устанавливаются разработчиком фаззи-системы, исходя из опыта, здравого смысла либо на основе экспертных оценок. Для однозначного определения входных значений фаззи-переменной множества степеней принадлежности необходимо выбрать форму термов такой, чтобы имело место перекрытие диапазонов, то есть начало и конец снижения степени принадлежности предыдущего терма должно совпадать с началом и концом повышения последующего.

Выбранные в нашем примере формы термов входной фаззи-переменной и диапазоны представлены на рис. 7.11, а, а выходной – на рис. 7.11, б.

Для упрощения записей операций при логической обработке вышеуказанные лингвистические термы обозначены символьно, соответственно, как NB, NM, ZE, PM, PB.

При разработке фаззи-системы характеристики входной фаззи-переменной удобно свести в таблицу, как это показано в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеризация входной фаззи-переменной

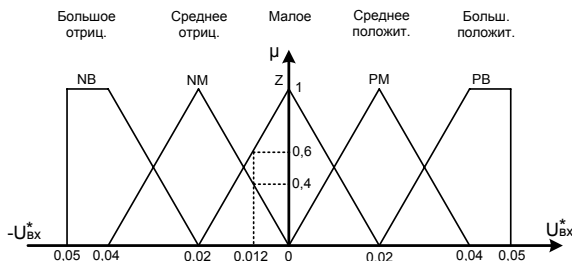
1. Имя фаззи-переменной Рассогласование скорости	2. Область определения от -0,05 до +0,05	3. Количество термов 5
4. Наименование терма	5. Форма терма	6. Граница терма
большое отрицательное	прямоугольная трапеция	$-0,05 \div -0,02$
среднее отрицательное	равнобедренный треугольник	$-0,04 \div 0$
малое	равнобедренный треугольник	$-0,02 \div +0,02$
среднее положительное	равнобедренный треугольник	$0 \div 0,04$
большое положительное	прямоугольная трапеция	$0,02 \div 0,05$

Заключительным шагом этапа фаззификации является определение *множества степеней принадлежности*. В процессе функционирования фаззи-регулятора оно определяется для текущих значений входной переменной, как это показано на рис. 7.11а. Например, при рассогласовании 0,012 множество степеней принадлежности имеет вид  $\{0; 0,4; 0,6; 0; 0\}$ . Это означает, что рассогласование -0,012 со степенью принадлежности 0,6 относится к терму «малое», со степенью принадлежности 0,4 – к терму «среднее отрицательное» и не принадлежит к остальным термам (степень принадлежности равна 0). *Список степеней принадлежности* является воспринимаемой компьютером формой представления текущего значения входной переменной фаззи-регулятора и используется на этапе логической обработки.

*Логическая обработка* по данным фаззификации в соответствии с заданными фаззи-правилами *активирует* термы выходной фаззи-переменной, т. е. устанавливает выходные термы, площади которых будут использованы при расчете выходного сигнала фаззи-регулятора, а также определяет вид этих площадей.

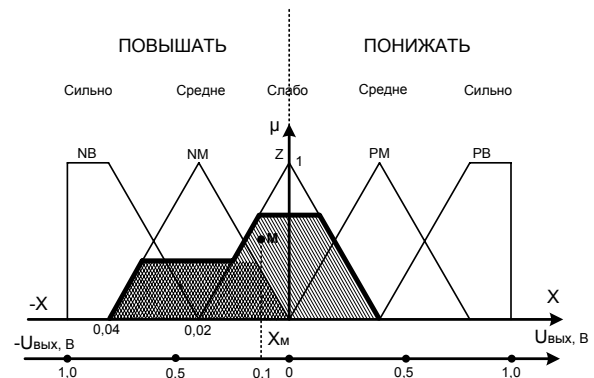
Уяснение сущности логической обработки произведем, исходя из следующих соображений:

Входная фаззи-переменная  
«Рассогласование»



а

Выходная фаззи-переменная  
«Изменять скорость»



б

Рис. 7.11. Термы входной и выходной фаззи-переменных

Принятая ранее логика управления предполагает: если рассогласование малое (входной терм Z), то выходной сигнал фаззи-регулятора слабый (выходной терм Z). Вышеприведенное условие представляет собой фаззи-правило логической обработки:

если Z, то Z.

Это означает, что принадлежность входного значения входному терму Z активирует (привлекает к использованию в дальнейшем процессе обработки информации) выходной терм Z. В результате логической отработки устанавливаются не только активные выходные термы, но и вид, в каком эти термы будут использованы в дальнейшем. Активированный выходной терм обрабатывается так называемым *инференц-оператором*, который определяет вид фигуры, используемой в дальнейших расчетах выходного сигнала ФР.

В вышеприведенном примере выходной терм активирован в виде прямоугольной трапеции с высотой равной 0,6, т.е. такой же, как и степень принадлежности входного терма Z.

Следует заметить, что во всех случаях *степень принадлежности активированного выходного терма не может превышать степень принадлежности на входе*. Левая часть фаззи-правила может содержать логические связки, например, если Z и NM, то NM.

В этом случае, если степени принадлежности входных термов  $Z$  и  $NM$  не нулевые, например, как в рассматриваемой системе при  $U_{\text{вх}}^* = -0,012 \{0; 0,4; 0,6; 0; 0\}$ , инференц-оператор должен выбрать, на каком уровне ограничить активируемый терм  $NM$  – на 0,6 или 0,4. Обычно для связок типа «И» выбирается МИНИМУМ-оператор, а для связок типа «ИЛИ» – МАКСИМУМ-оператор. Т.е. для вышеприведенного правила выходной терм следовало бы усечь на уровне 0,4.

Выполним в свете вышеизложенного логическую обработку результатов фаззификации (см. рис. 7.11, б). Прежде всего, необходимо установить правила логической обработки. Пусть это будут:

если  $NB$ , то  $NB$ , если  $NM$ , то  $NM$ ,  
 если  $Z$ , то  $Z$ ,  
 если  $PM$ , то  $PM$ , если  $PB$ , то  $PB$ .

Посмотрим, каковы будут результаты логической обработки для сигнала  $U_{\text{вх}}^* = -0,012$ .

В соответствии со списком степеней принадлежности  $\{0; 0,4; 0,6; 0; 0\}$  активными (т. е. приводящими к активации выходных термов) будут 2-ое и 3-е правила, а активированы выходные термы  $NM$  и  $Z$ , при этом терм  $NM$  усекается на уровне 0,4, а терм  $Z$  – на уровне 0,6. Остальные термы не активируются, так как их степени принадлежности равны нулю.

Таким образом, результатом логической обработки для  $U_{\text{вх}}^* = -0,012$  является фигура в виде наложения двух усеченных трапеций, как это показано на рис. 7.11, б.

Вышеуказанная фигура представляет собой нечеткое множество, а выходной сигнал ФР должен иметь четкое численное значение. Получение такого значения, исходя из результатов логической обработки, осуществляется процедурой *дефаззификации*.

*Дефаззификация* – это определение по нечетким выходным данным логической обработки конкретного значения выходного сигнала фаззи-регулятора.

Существуют разные приемы дефаззификации. Один из них (способ центроида) – вычисление проекции на ось  $X$  центра масс фигуры активации (заштрихованная часть рис. 7.11, б) по формуле:

$$x_M = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx}, \quad (7.4)$$

где  $\mu(x)$  – кривая, ограничивающая совокупность усеченных площадей активированных термов.

Задав соответствие между абсциссой  $X$  и значением выходного сигнала фаззи-регулятора –  $U_{\text{вых}}$ , установим, что правая граница выходного терма РВ  $x_F$  соответствует  $U_{\text{max}} = 1$  В. Тогда численное значение выходного сигнала равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{x_F} \cdot x_M \text{ В.}$$

Вышеприведенная формула дефаззификации предполагает учет перекрывающейся части площадей (дважды заштрихованной) один раз. Имеются методики дефаззификации, обеспечивающие двукратный учет данной площади.

Отметим еще одну из часто используемых методик дефаззификации с использованием *синглетон функций*. Если выбрать функции принадлежности выходных термов независимыми от  $X$ , например, в виде прямоугольников (рис. 7.12), выходное значение можно рассчитать по формуле:

$$x_s = \frac{\mu_A x_A + \mu_B x_B}{\mu_A + \mu_B}. \quad (7.5)$$

Эффект повышения показателей регулирования по сравнению с традиционными линейными системами базируется на том, что линейный регулятор заменяется нелинейным. Искусство разработчика заключается в таком выборе числа, форм и границ термов, правил логической обработки и метода дефаззификации, которые обеспечат требуемый характер изменения выходного сигнала фаззи-регулятора. При этом нелинейность выходной характеристики должна быть такой, чтобы в свою очередь обеспечивались заданные показатели регулирования.

Следует отметить, что фаззи-регулятор может иметь несколько входов. При этом принципы его функционирования сохраняются такими, как это было описано выше.

Синтез фаззи-регулятора производят, используя, например, пакеты программ Fuzzy Logic Toolbox, входящих в пакет MATLAB.

Однако в их описании, как впрочем, и в многочисленной литературе по фаззи-системам, нет систематизированных рекомендаций, как обеспечить изменения характера выходного сигнала от входных в требуемую сторону.

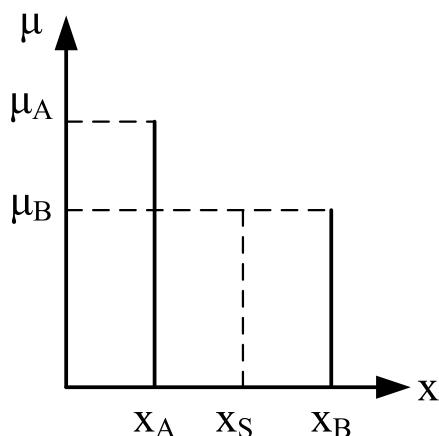


Рис. 7.12. Выходные термы

Выполненные исследования влияния фаззи-данных и правил на выходные характеристики фаззи-регулятора позволяют рекомендовать некоторые из правил и приемов при формировании их желаемого вида. Использование этих правил дает возможность разработчику целенаправленно изменять в процессе синтеза количество термов, их форму и параметры, правила логической обработки и метод дефаззификации.

Напомним структурную схему фаззирегулятора (рис. 7.13).

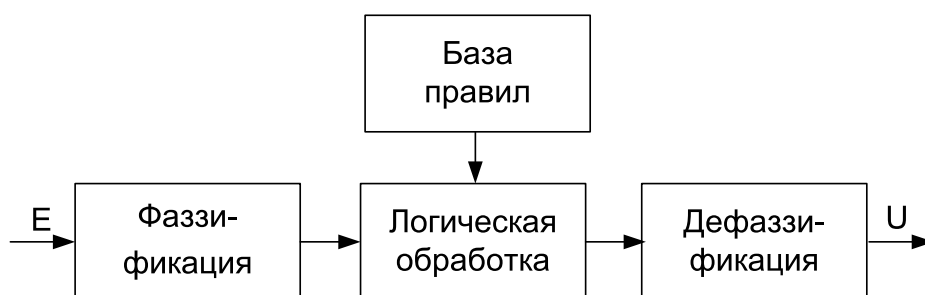


Рис. 7.13. Структурная схема фаззи-регулятора

Фаззи-регулятор преобразует четкий входной сигнал ( $E$ ) в четкий выходной сигнал ( $U$ ). При этом на первом этапе – этапе фаззификации четкий входной сигнал преобразуется во входную нечеткую (фаззи) переменную. На втором этапе в соответствии с базой правил входная фаззи-переменная преобразуется в выходную

фаззи-переменную. На третьем этапе выходная фаззи-переменная преобразуется в четкий выходной сигнал фаззи-регулятора.

Процесс обработки входного сигнала в фаззи-регуляторе с использованием употребляемой в описаниях Fuzzy Logic Toolbox терминологии, приведен на рис. 7.14.

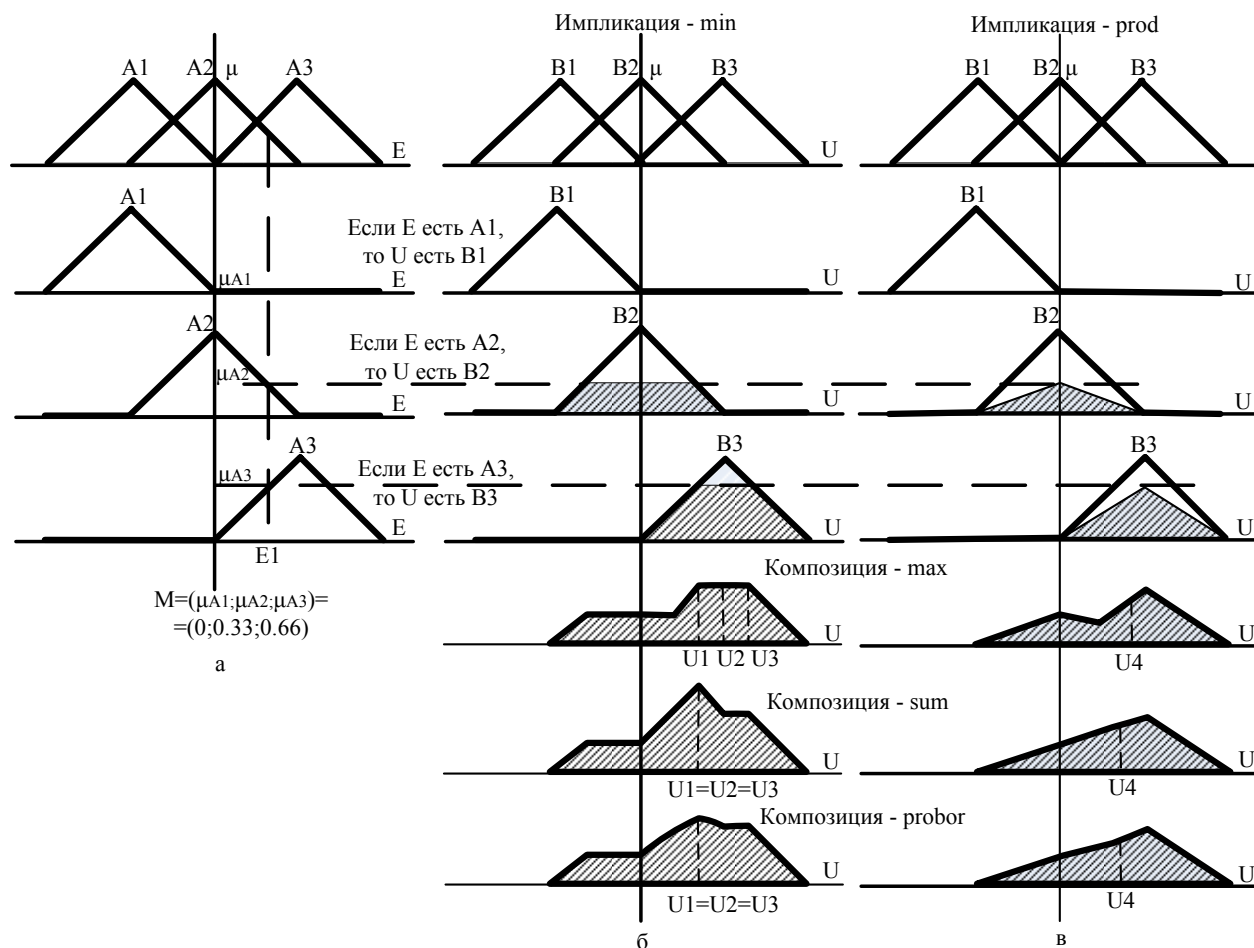


Рис. 7.14. Процесс обработки входного сигнала в фаззи-регуляторе

**Импликация** – процедура получения из термов выходной фаззи-переменной по их степеням активации некоторых фигур (имплицированных термов) в соответствии с выбранным оператором импликации.

**Композиция** – процедура формирования комбинированного терма выходной фаззи-переменной из имплицированных термов в соответствии с выбранным оператором композиции.

**Дефаззификация** – определение четкого значения выходного сигнала фаззи-регулятора по комбинированному терму выходной фаззи-переменной.

Оценка влияния параметров термов входной и выходной фаззи-переменных на выходную характеристику фаззи-регулятора проводилась с использованием для дефаззификации метода **centroid**, для импликации – оператор **min**, для композиции – **max** и следующая база правил: если (Е есть NB), то (U есть NB);

если (Е есть NM), то (U есть NM);  
если (Е есть ZE), то (U есть ZE);  
если (Е есть PM), то (U есть PM);  
если (Е есть PB), то (U есть PB).

На рис. 7.15–7.20 показано изменение выходных характеристик фаззи-регулятора при изменении параметров термов. На рисунках буквенные обозначения «а» соответствуют входным термам, «б» – выходным, а «в» – выходной характеристике  $U = f(E)$ .

Влияние логических фаззи-правил на выходную характеристику регулятора иллюстрирует рис. 7.21, на котором приведены параметры входной и выходной переменных, а также наборы логических правил и соответствующие им выходные характеристики фаззи-регулятора.

Анализ показывает:

– введение трапецеидальных термов входной фаззи-переменной (рис. 7.17 а) приводит к стабилизации выходного сигнала в диапазоне верхнего основания трапеции (рис. 7.17 в). Если трапецеидальным выполняется средний терм входной фаззи-переменной, то в выходной характеристике регулятора формируется зона нечувствительности, шириной верхнего основания трапеции (рис. 7.18 в);

– изменение формы термов выходной фаззи-переменной приводит к появлению в выходной характеристике регулятора выпуклостей и вогнутостей: если площадь предыдущего терма (слева – направо) больше площади последующего, то в выходной характеристике возникает «вогнутость», а если площадь предыдущего терма меньше площади последующего, то в выходной характеристике возникает «выпуклость» (рис. 7.19-7.20);

– «симметричное» изменение заключений логических правил (правила рис. 7.21 г по отношению к правилам рис. 7.21 в, а также правила рис. 7.21 е по отношению к правилам рис. 7.21 д) приводит к симметричному отображению выходной характеристики фаззи-регулятора относительно оси ординат;



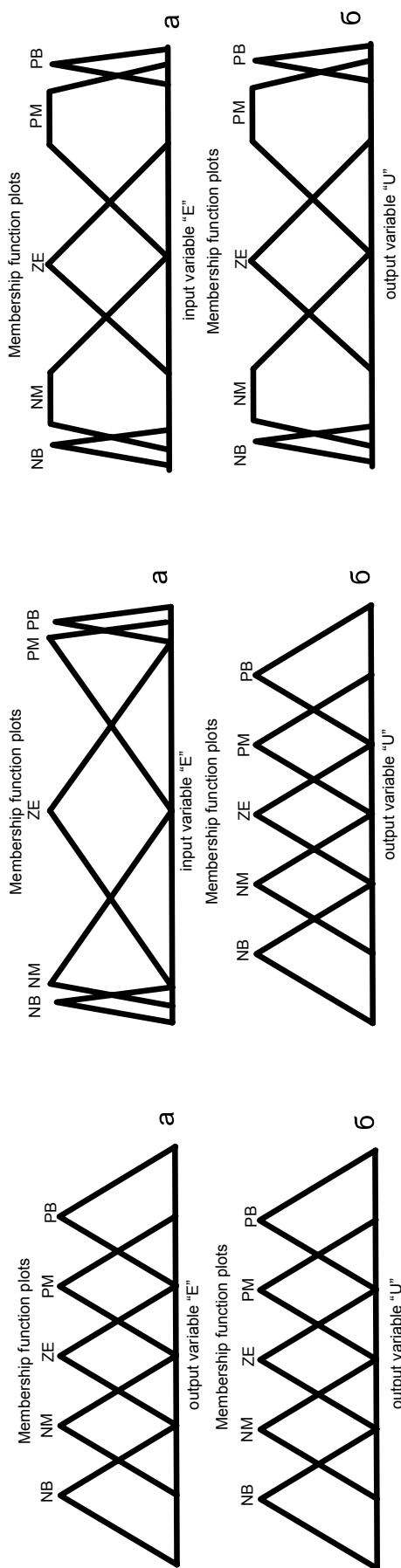


Рис. 7.15

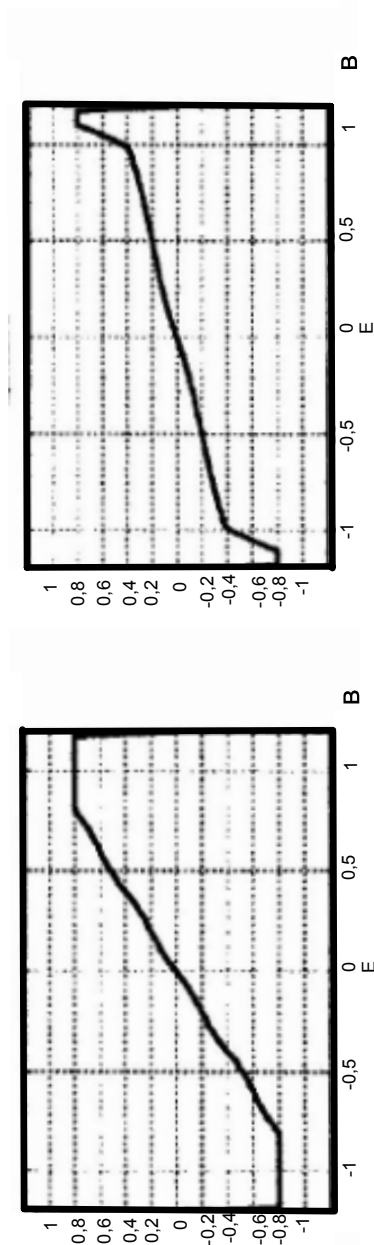


Рис. 7.16

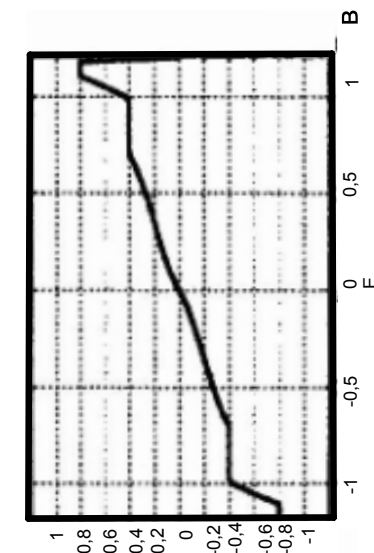


Рис. 7.17

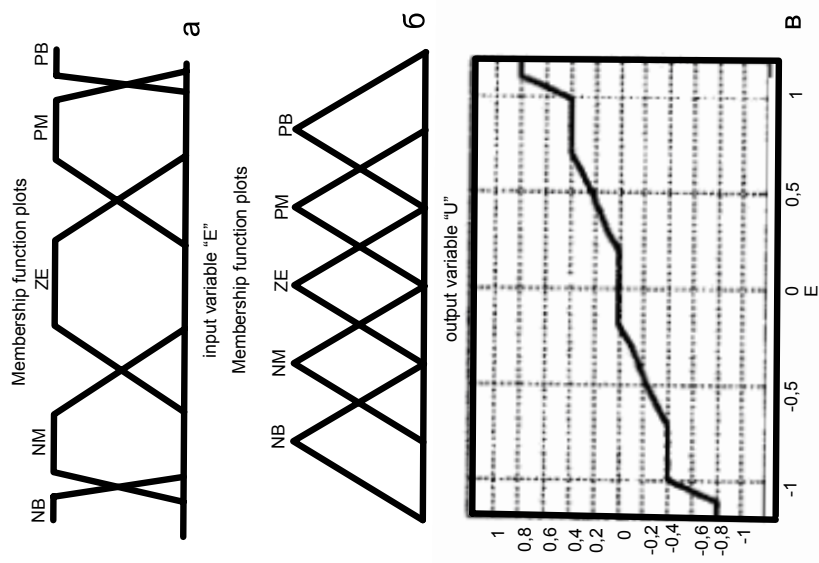


Рис. 7.18

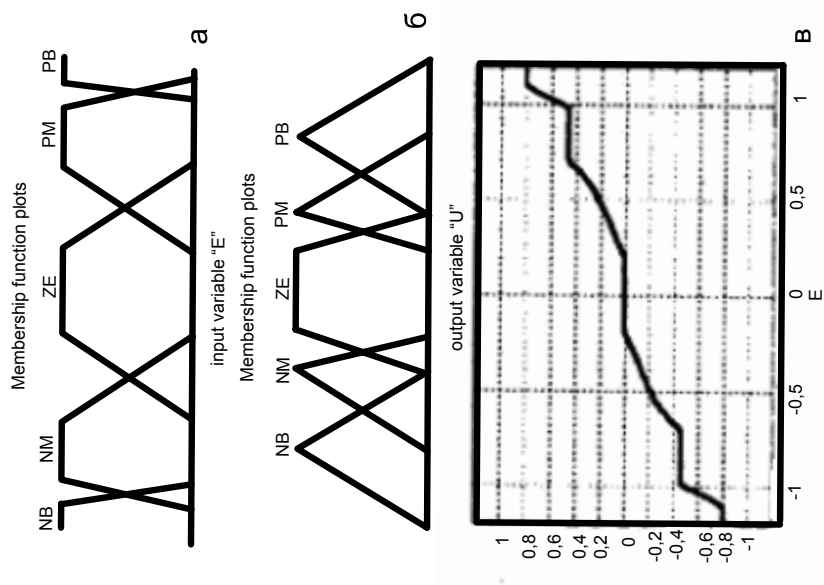


Рис. 7.19

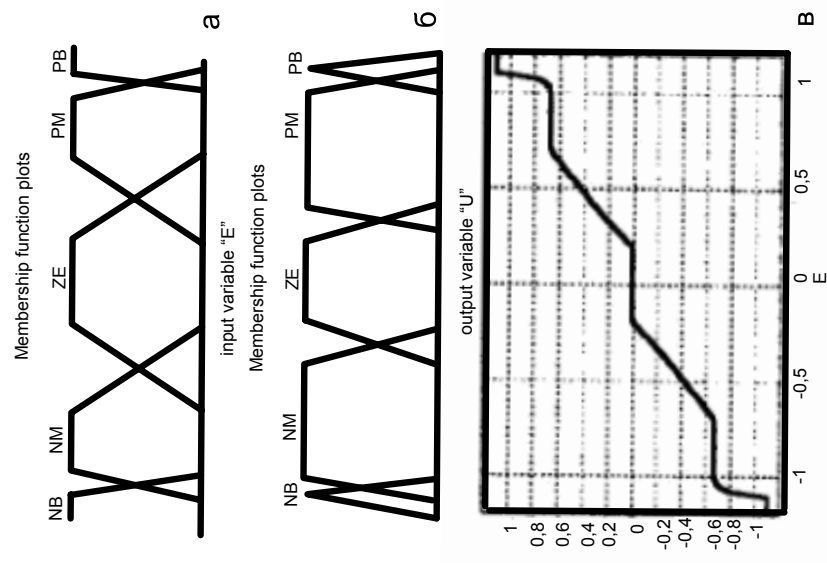
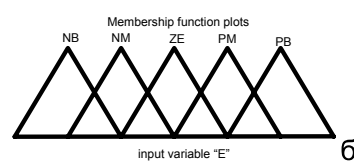
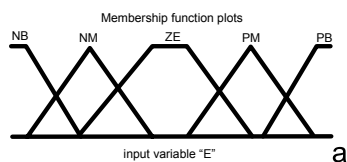
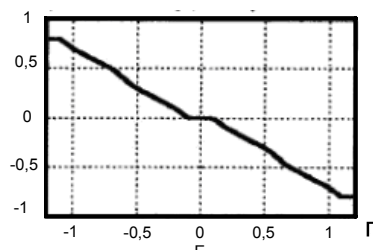
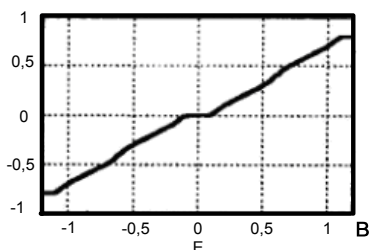


Рис. 7.20



Если (E есть NB), то (U есть NB);  
 Если (E есть NM), то (U есть NM);  
 Если (E есть ZE), то (U есть ZE);  
 Если (E есть PM), то (U есть PM);  
 Если (E есть PB), то (U есть PB).

Если (E есть NB), то (U есть PB);  
 Если (E есть NM), то (U есть PM);  
 Если (E есть ZE), то (U есть ZE);  
 Если (E есть PM), то (U есть NM);  
 Если (E есть PB), то (U есть NB).



Если (E есть NB), то (U есть NM);  
 Если (E есть NM), то (U есть NB);  
 Если (E есть ZE), то (U есть ZE);  
 Если (E есть PM), то (U есть PB);  
 Если (E есть PB), то (U есть PM).

Если (E есть NB), то (U есть PM);  
 Если (E есть NM), то (U есть PB);  
 Если (E есть ZE), то (U есть ZE);  
 Если (E есть PM), то (U есть NB);  
 Если (E есть PB), то (U есть NM).

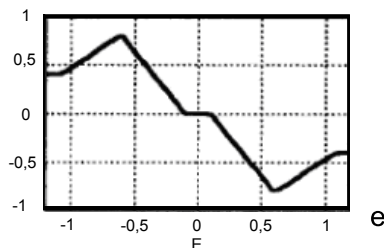
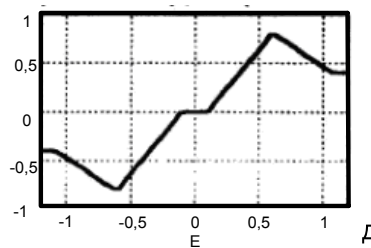


Рис. 7.21. Выходные характеристики фаззи-регулятора при изменении базы правил

– изменение заключений «соседних» логических правил (правила рис. 7.21 д по отношению к правилам рис. 7.21 в, а также правила рис. 7.21 е по отношению к правилам рис. 7.21 г) приводит к появлению в выходной характеристике фаззи-регулятора так называемых «падающих» участков, то есть участков, где увеличению входного сигнала соответствует уменьшение выходного сигнала.

Приведенные правила не исчерпывают всех возможностей формирования фаззи-регулятором выходной характеристики требуемого вида. Примеры использования иных методов дефаззификации (bisector, mom, lom, som), операторов импликации prod, min и операторов композиции max, sum probor приведены в литературе.

В тех случаях, когда число входных фаззи-переменных регулятора больше единицы, логические фаззи-правила усложняются, а выходная характеристика становится функцией нескольких переменных. При двух входных фаззи-переменных выходная характеристика

регулятора может быть интерпретирована трехмерной поверхностью, при  $n$ -входных фаззи-переменных она является функцией в  $(n + 1)$ -мерном пространстве.

#### 7.4.2. Метод нейронных сетей. Генетические алгоритмы синтеза нейронных сетей

Метод управления на основе нейронных сетей использует способы приема и обработки информации мозгом человека. При этом несоизмеримо более высокое быстродействие компьютера и способность нелинейного преобразования сигналов обеспечивают компьютеру большое преимущество при решении задач управления техническими системами.

Основными элементами обработки информации в мозге человека являются нейроны. В коре человеческого мозга содержатся около  $10^{10}$  нейронов, причем каждый из них имеет в среднем около 10 000 соединений с другими нейронами. То есть в мозге человека содержится  $10^{14}$  соединений. Ниже приведена структура нейрона (рис. 7.22).

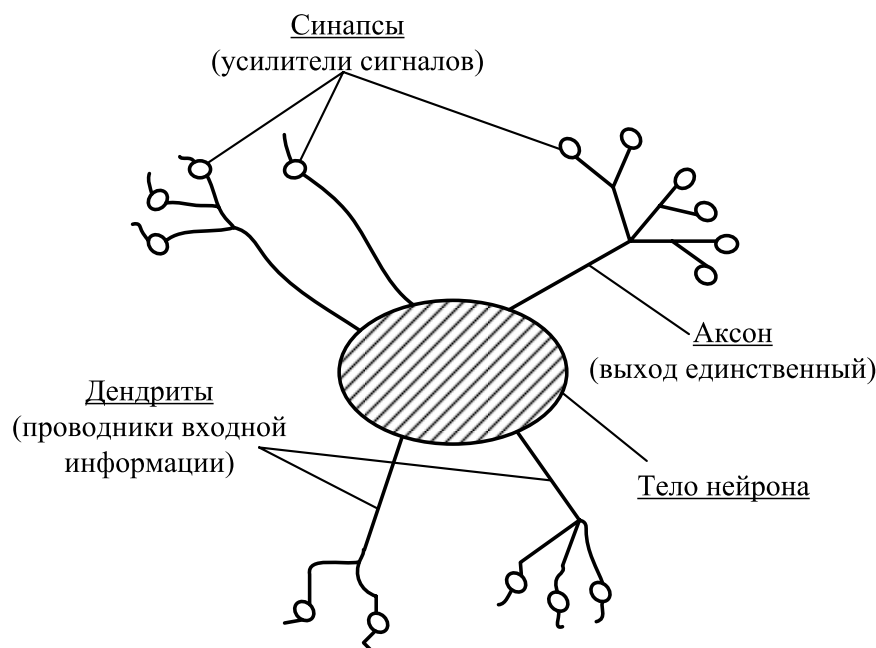


Рис. 7.22. Структура нейрона

Как и любой процессор, нейрон имеет входы и выход. Информация в виде электрохимического раздражения передается по проводникам (дендритам), при этом между входом одного нейрона и выходом (аксоном) каждого предыдущего нейрона имеется еще одна клетка (синапс), которая усиливает или ослабляет приходящий сигнал.

Нейрон может быть либо пассивен, либо активен в зависимости от уровня пришедшего на него входного потенциала, равного сумме поступивших на него потенциалов от соединений с другими нейронами. Активным он становится, если входной потенциал превышает +30 мВ. То есть нейрон моделирует состояние 0 при  $U_{\text{вх}} \leq 30$  мВ и 1 при  $U_{\text{вх}} > 30$  мВ. Максимальная частота изменения состояния нейрона 250 имп/сек (иногда до 1000 имп/сек). Нейрон можно смоделировать следующим образом (рис. 7.23).

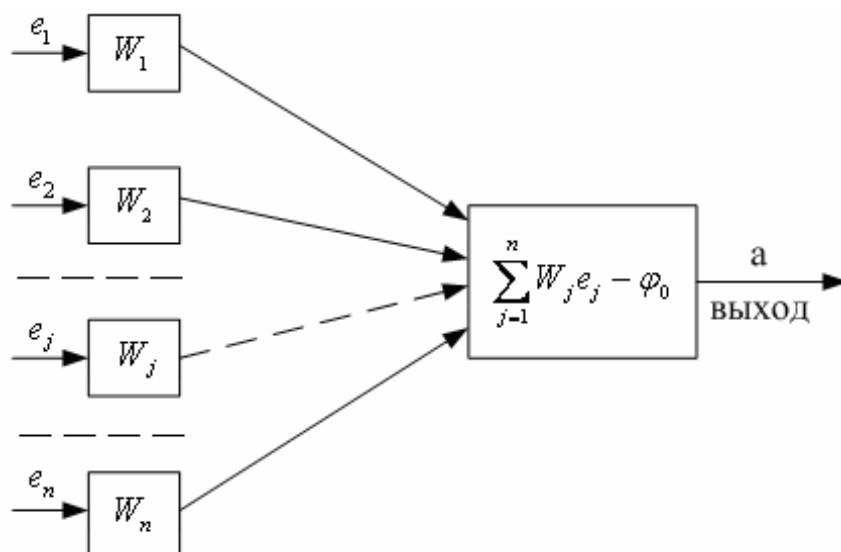


Рис. 7.23. Модель нейрона

В данной модели –  $e_1, e_2, \dots, e_j, \dots, e_n$  – выходные сигналы предшествующих нейронов, соответствующие значениям 0 или 1, и являющиеся входными сигналами для рассматриваемого нейрона.  $W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_n$  – *весовые коэффициенты*, представляющие собой вещественные числа (коэффициенты усиления или ослабления входных сигналов синапсами),  $\varphi_0$  – пороговый сигнал активизации нейрона.

Суммарный входной сигнал равен:

$$net = \sum_{j=1}^n W_j e_j. \quad (7.6)$$

Выходной сигнал нейрона

$$a = f(net - \varphi_0) = f(z), \quad (7.7)$$

где  $z = net - \varphi_0$ ,

причем

$$\begin{aligned} (net - \varphi_0) &> 0 \\ (net - \varphi_0) &\leq 0. \end{aligned} \tag{7.8}$$

Схематически нейрон можно представить в следующем виде (рис. 7.24).

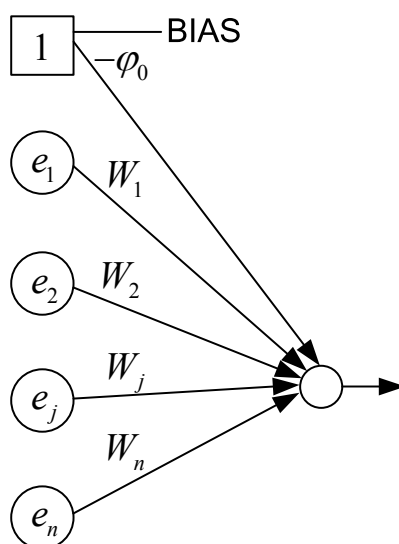


Рис. 7.24. Схема нейрона

В данной схеме введен дополнительный вход «BIAS», называемый сдвигом со значением равным 1 и весовым коэффициентом равным  $-\varphi_0$ , который отражает влияние порога активации.

Компьютерное моделирование нейрона допускает его активацию с обеспечением выходного сигнала не только в виде 0 или 1 (бинарной функции), а и в виде других значений, определяемых с помощью так называемой *активационной (передаточной) функции* нейрона. Активационная функция  $f(x)$ , где  $x = net$  может иметь следующий вид (рис. 7.25). При этом величина сдвига  $-\varphi_0$  для каждого из нейронов имеет свое значение.

Использование нелинейных активационных функций придает компьютерной модели нейрона характер нелинейного звена, а варьирование порогового значения  $-\varphi_0$ , еще больше расширяет функциональные возможности модели.

Несколько соединенных между собой нейронов образуют простейшую нейронную сеть. На рис. 7.26 представлена подобная сеть с BIAS.

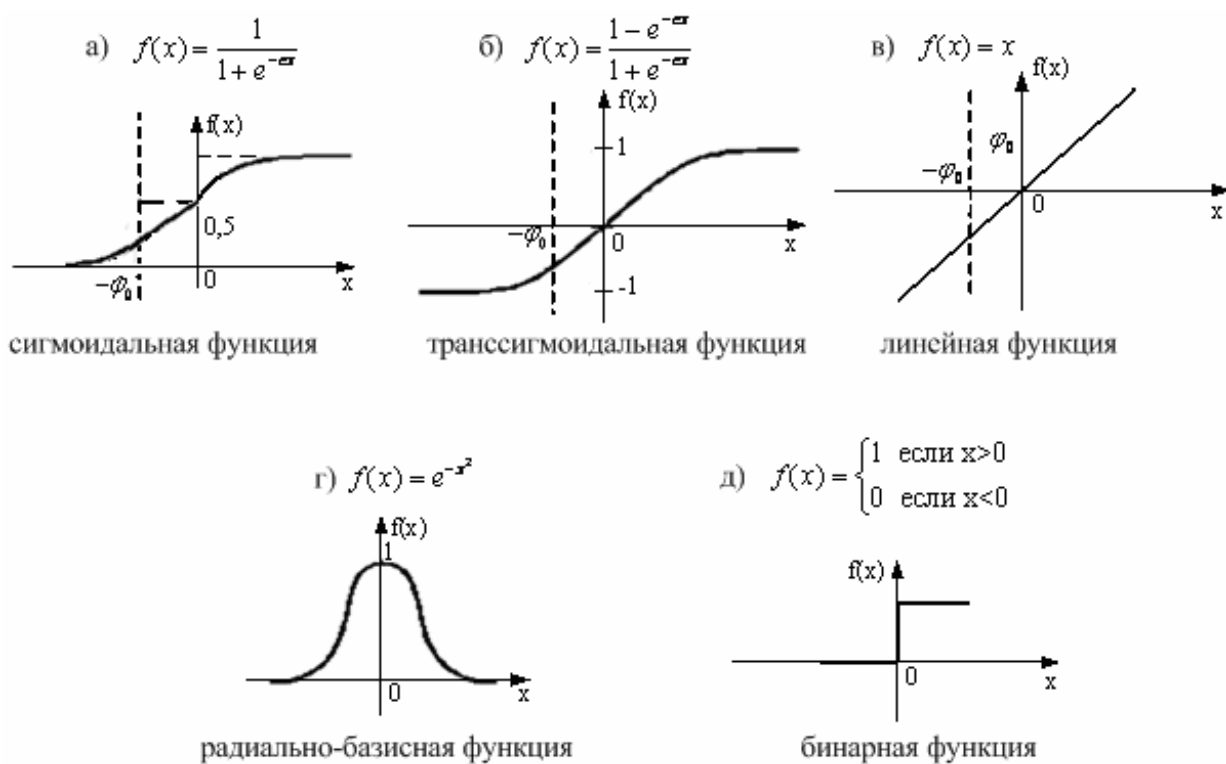


Рис. 7.25. Виды активационных функций

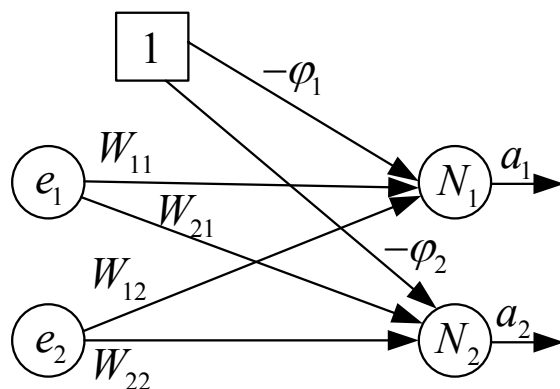


Рис. 7.26. Простейшая нейронная сеть с BIAS

Для такой сети очевидно справедливо:

$$\begin{aligned} a_1 &= f(net_1 - \varphi_1) \\ a_2 &= f(net_2 - \varphi_2)' \end{aligned} \quad (7.9)$$

где

$$\begin{aligned} net_1 &= e_1 W_{11} + e_2 W_{12} \\ net_2 &= e_1 W_{21} + e_2 W_{22} \end{aligned} \quad (7.10)$$

Для использования матричных методов вычислений запишем:

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}; \quad W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}; \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}; \quad \varphi = \begin{bmatrix} -\varphi_1 \\ -\varphi_2 \end{bmatrix}. \quad (7.11)$$

где  $e$  – вектор входных значений;  $a$  – вектор выходных значений;  $W$  – матрица весовых коэффициентов;  $\varphi$  – вектор сдвигов.

Очевидно, в матричной форме справедливо

$$Net = We \quad (7.12)$$

$$A = f(net - \varphi)$$

Из рассмотренного примера видно, что нейронную сеть можно задать матрицей, размерность которой определяется числами входов и нейронов в слое. Из этого также следует, что *преобразование сигналов в нейронной сети базируется на хорошо программно обеспеченных методах матричного исчисления, реализуемых в процессорах.*

Нейронная сеть может быть достаточно сложной и включать в себя значительное число нейронов, расположенных в нескольких слоях, как показано на рис. 7.27.

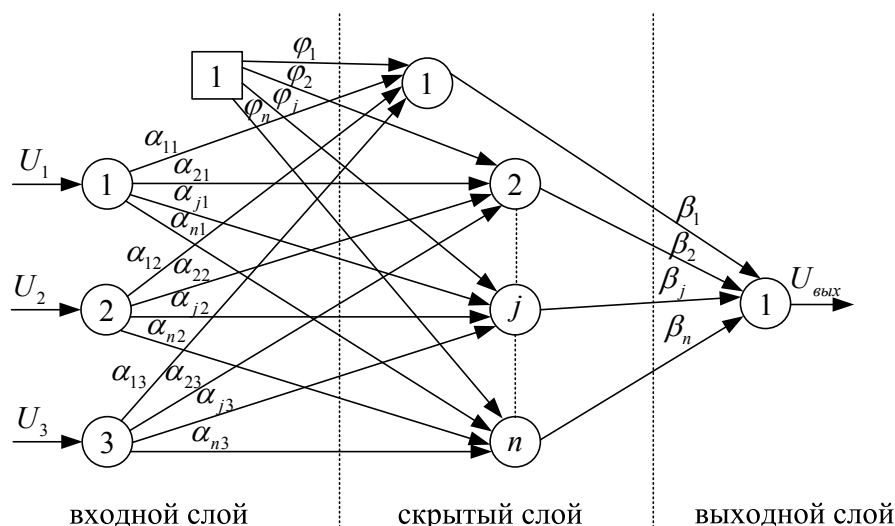


Рис. 7.27. Трехслойная нейронная сеть (персептрон)

В данной сети три слоя нейронов: входной, скрытый и выходной (в нашем случае состоящий из одного нейрона). Сеть работает следующим образом. Входные сигналы  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  пере-



даются каждому из нейронов скрытого слоя, будучи предварительно умноженными, на значения соответствующих весовых коэффициентов:  $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{j1}, \dots, \alpha_{n1}, \dots, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{j2}, \dots, \alpha_{n2}, \dots, \alpha_{13}, \dots, \alpha_{j3}, \dots, \alpha_{n3}$ .

Выходной сигнал каждого  $j$ -го нейрона скрытого слоя представляет собой значение активационной функции суммы всех пришедших на него сигналов от входных нейронов, с учетом сдвига  $\varphi_j$ . Выходные сигналы нейронов скрытого слоя с весовыми коэффициентами  $\beta_j$  передаются на выходной нейрон, где также суммируются и могут быть обработаны активационной функцией.

Несмотря на более сложный характер сети, соотношения для нее в матричной форме для каждой пары слоев сохраняются в виде ранее описанных для простейшей сети (7.14), что обеспечивает удобство компьютерной обработки сигналов и расчета выходного сигнала.

Задача разработчика при проектировании электропривода, использующего нейроконтроллер, – выполнить **синтез нейронной сети**. Это означает, что нужно определить такое *число слоев и количество нейронов* в каждом слое, *значения весовых коэффициентов  $\alpha_{ji}$ ,  $\beta_j$ , значения сдвигов  $\varphi_j$ , вид активационной функции*, которые бы обеспечили требуемые показатели качества управления.

Приведем некоторые соображения, которые следует учитывать при синтезе нейронной сети.

При выборе числа слоев и числа нейронов в скрытых слоях исходят из того, что большое их число расширяет возможности нейронной сети по формированию требуемого сигнала управления, однако усложняет сеть, и увеличивает время расчета. Чрезмерное усложнение сети не оправдывает себя и главным фактором при выборе структуры сети является опыт разработчика.

Оценим сложность задачи синтеза НС, приняв в качестве примера структуру нейронной сети, представленную на рис. 7.27, которая должна обеспечить управление электромеханической системой с заданными динамическими показателями. Три нейрона во входном слое и один в выходном определяются выбранной логикой управления. Число нейронов в скрытом слое установим равным 10. Активационную функцию для скрытого слоя выбираем трансигмоидального вида, учитывая, что она обеспечивает нелинейное преобразование сигнала с выдачей как положительных, так и отрицательных значений выходных сигналов нейронов.

В соответствии с выбранной структурой, синтезируя нейронную сеть, необходимо определить 50 параметров: 30 весовых коэффициентов  $\alpha_{ji}$ , характеризующих связи между нейронами входного слоя и нейронами скрытого слоя, 10 коэффициентов сдвига и 10 коэффициентов  $\beta_j$ , характеризующих преобразование сигналов от нейронов скрытого слоя к выходному. То есть поиск необходимых значений коэффициентов необходимо вести в 50-мерном пространстве. Выбор значений весовых коэффициентов и сдвигов может быть произведен несколькими методами. Например, методом Монте-Карло, (т.е. методом случайных чисел) задается сочетание интересующих нас параметров  $(\alpha_{11}, \dots, \alpha_{ji}, \dots, \beta_1, \dots, \beta_n, \dots, \varphi_1, \dots, \varphi_n)$ . Для каждого из сочетаний параметров по математической модели электромеханической системы с нейроконтроллером, на компьютере рассчитывается динамический процесс, и определяются интересующие нас динамические показатели. Далее в соответствии с методом градиентного спуска даются приращения тем или иным весовым коэффициентам и вновь определяются вышеуказанные динамические показатели. Выбрав направление изменения весовых коэффициентов, дающее наилучшее изменение динамических показателей продолжают изменение весовых коэффициентов до тех пор, пока не получат наилучшие из них.

Процесс синтеза весовых коэффициентов можно было бы вести, задав предварительно, желаемый вид переходного процесса для типового управляющего или возмущающего воздействия. При этом можно в заданные моменты времени вычислять отклонение выходной координаты от значений эталонной модели и методом градиентного спуска, определять весовые коэффициенты обеспечивающие, например, минимум среднеквадратичной ошибки. Этот метод носит название BACK PROPAGATION (метод обратного расчета ошибки). Его недостаток – нет уверенности, что полученный результат наилучший. Действительно, допустим нас интересует минимум какого-то динамического параметра  $\lambda$ , а его зависимость от весового коэффициента  $\alpha_i$  имеет вид, показанный на рис. 7.28.

В зависимости от исходного значения  $\alpha_1$  расчет по выше приведенному методу может привести нас в точки экспериментов 1, 3, 4 (но не в наилучшую точку – 2). Чтобы избежать этого задают большое число сочетаний значений весовых коэффициентов, охваты-

вая как можно большую область параметров, что, конечно, усложняет и затягивает расчет.

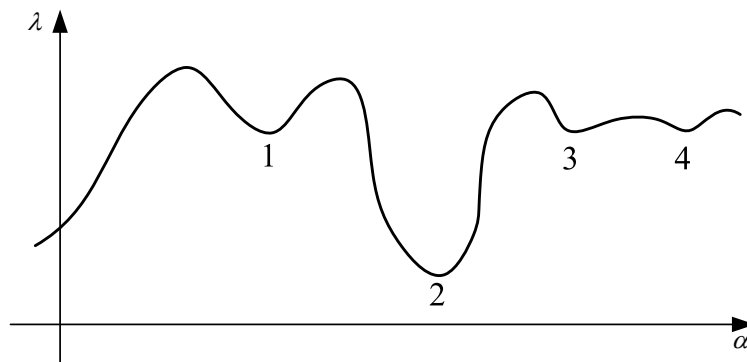


Рис. 7.28. К определению глобального экстремума

Существуют и другие методы синтеза (обучения) нейронной сети; например, обучение с наблюдением (Supervised learning), обучение без наблюдения (Unsupervised learning).

Опишем более подробно еще один из эффективных методов синтеза (обучения) нейронной сети, обеспечивающей нахождение глобального экстремума (наилучшего результата). Данный метод, копирует генетические законы природы, и получил название метода *генетических алгоритмов*.

Сущность его заключается в следующем.

Значение каждого весового коэффициента  $\alpha_{ij}$  и  $\beta_j$  и коэффициентов сдвигов  $\varphi_j$  кодируется в двоичном коде и совокупность их расположенных в строго определенном порядке образует так называемую *хромосому*, что схематично показано на рис. 7.29. Количество ячеек, выделенных под каждый из коэффициентов, зависит от точности, с которой он должен быть задан. Например, если требуется обеспечить точность до сотых – выделяется 7 ячеек, тысячных – 10 и так далее.

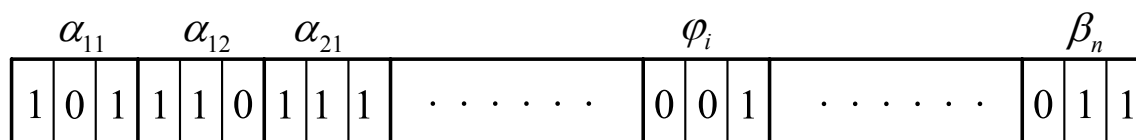


Рис. 7.29. Хромосома нейронной сети

Далее методом случайных чисел задается определенное число таких хромосом, каждая из которых определяет настройку нейроконтроллера.

На компьютере рассчитываются переходные процессы и динамические показатели рассматриваемой электромеханической системы для каждого из наборов  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_j$  и  $\varphi_i$ , соответствующих каждой из хромосом, после чего отбирается некоторое число сочетаний, обеспечивших лучшие значения динамических показателей, а часть «худших» хромосом отбрасывается.

Далее методом случайных чисел отбираются хромосомные пары и производится их «скрещивание» по законам, которые имеют место в природе. Например, есть два отобранных родителя. Например, №3 и №7. Генератор стохастических чисел выбрасывает место пересечения хромосом, например, 6 (шестая ячейка).

Если при скрещивании используется метод кроссовера (рис. 7.30), то это означает, что потомок будет иметь *хромосому*, в которой шесть первых ячеек будут иметь значение 1-го родителя, а остальные ячейки 2-го. Подобным образом создается первоначальное число новых «особей» – «родителей». Синтез новых хромосом предусматривает не только кроссоверное скрещивание, но и мутации, двойные кроссоверы. Число последних видов скрещивания существенно меньше кроссовера, как это имеет место в природе.

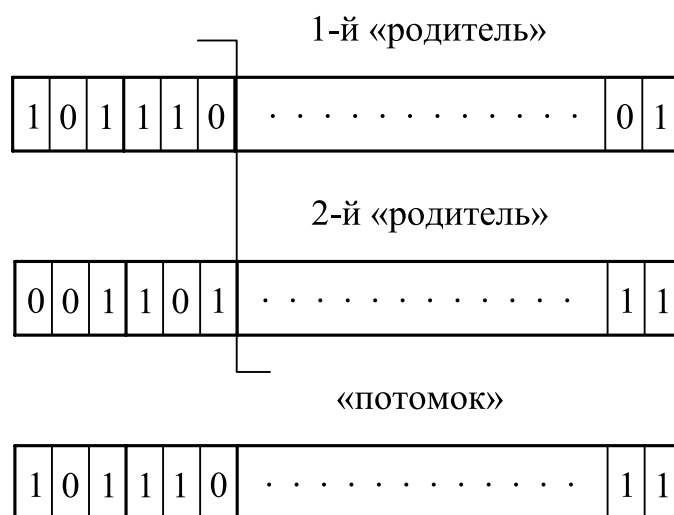


Рис. 7.30. Кроссовер в методе генетических алгоритмов

С полученными значениями «хромосом» также производится расчет переходного процесса, и вновь отбираются лучшие «особи» – то есть сочетания значений коэффициентов и сдвигов, обеспечивающие лучшие по сравнению с другими «особями» показатели качества регулирования (перерегулирование, быстродействие, среднеквад-

ратичную ошибку). Процесс повторяется до тех пор, пока синтезируется хромосома, обеспечивающая требуемое качество динамических показателей.

В данном методе, как и в природе, работает принцип: «От хороших родителей обычно рождаются хорошие дети», хотя и требует большого количества расчетов. Например, при синтезе нейронной сети для электромеханической системы с нелинейной нагрузкой типа «пара трения» было перебрано 20 000 «хромосом». В 1995 году расчет на Pentium 3 занял 30 часов, после чего были получены значения, обеспечившие устранение фрикционных автоколебаний. Современные персональные компьютеры в состоянии решать аналогичную задачу в пределах одного часа и быстрее.

Нейронные сети, применяемые в качестве нелинейных регуляторов электромеханических систем, реализуемые в нейроконтроллерах (НК), могут иметь различные, довольно сложные, структуры, определяемые большим числом параметров. Кроме весовых коэффициентов, к таким параметрам относятся число слоев, число нейронов в различных слоях искусственной нейронной сети, количество и величина задержек (сдвигов), поступающих на вход искусственной нейронной сети, вид активационной функции нейронов скрытого слоя и некоторые другие. Очевидно, что при различном сочетании вышеперечисленных параметров НК, у замкнутой электромеханической системы будут проявляться и различные динамические свойства. Для синтеза нейронной сети могут быть использованы пакеты в среде MATLAB 2013 (Neural Network Toolbox и Genetic Algorithms Toolbox).

#### *7.4.3 Гибридные нейронные сети*

Ранее на примере фаззи-регулятора с одним входом было показано, как, изменяя число термов и их параметры, видоизменять его выходную характеристику в требуемом направлении, получая сложные нелинейные зависимости. Увеличение числа входов фаззи-регулятора расширяет возможности по формированию вида зависимостей выходного сигнала от входных. При двух входах выходной сигнал может быть представлен поверхностью 3-х мерного пространства, а при  $n$ -входах –  $(n+1)$ -мерного. Таким образом, увеличивая число входов, можно формировать практически любые зависимости выходного сигнала от входных.

Однако увеличение числа входных сигналов приводит к существенному увеличению базы правил логической обработки. Число правил равно произведению количества термов всех входных переменных:

$$N = \prod_{i=1}^k n_i, \quad (7.13)$$

где  $N$  – число правил фаззи-регулятора;  $n_i$  – число термов  $i$ -ой входной переменной;  $k$  – число входных переменных.

То есть, если каждую входную переменную описать 5-ю термами, то при одном входе при логической обработке необходимо выполнить 5 правил, при 2-х – 25, а при 3-х уже 125. Помимо того, что при работе фаззи-регулятора данное обстоятельство приводит к увеличению времени вычисления выходного сигнала, существенно усложняется процесс синтеза фаззи-регулятора.

В то же время алгоритмы определения параметров нейронной сети достаточно хорошо разработаны и апробированы. Несмотря на большое число весовых коэффициентов и сдвигов, подлежащих определению при синтезе нейро-регулятора, они автоматически вычисляются компьютером на основе, например, метода Back propagation или метода генетических алгоритмов. Это привело к выводу о целесообразности разработки устройств, объединяющих преимущества фаззи-систем, и нейронных сетей, что нашло отражение в гибридных нейронных сетях (ГНС), получивших в зарубежной литературе наименование ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System).

В ГНС осуществляется интерпретация фаззи-регулятора нейронной сетью таким образом, что выполнение традиционных для него операций преобразования входных сигналов производится по архитектуре нейронной сети, что позволяет автоматизировать процесс синтеза.

Поясним принцип действия ГНС на примере шестислойной сети с двумя входами системы Сугено (рис. 7.31).

*Входной слой* производит распределение сигналов на второй слой сети. Узлы первого слоя не выполняют никаких математических операций над входными сигналами.

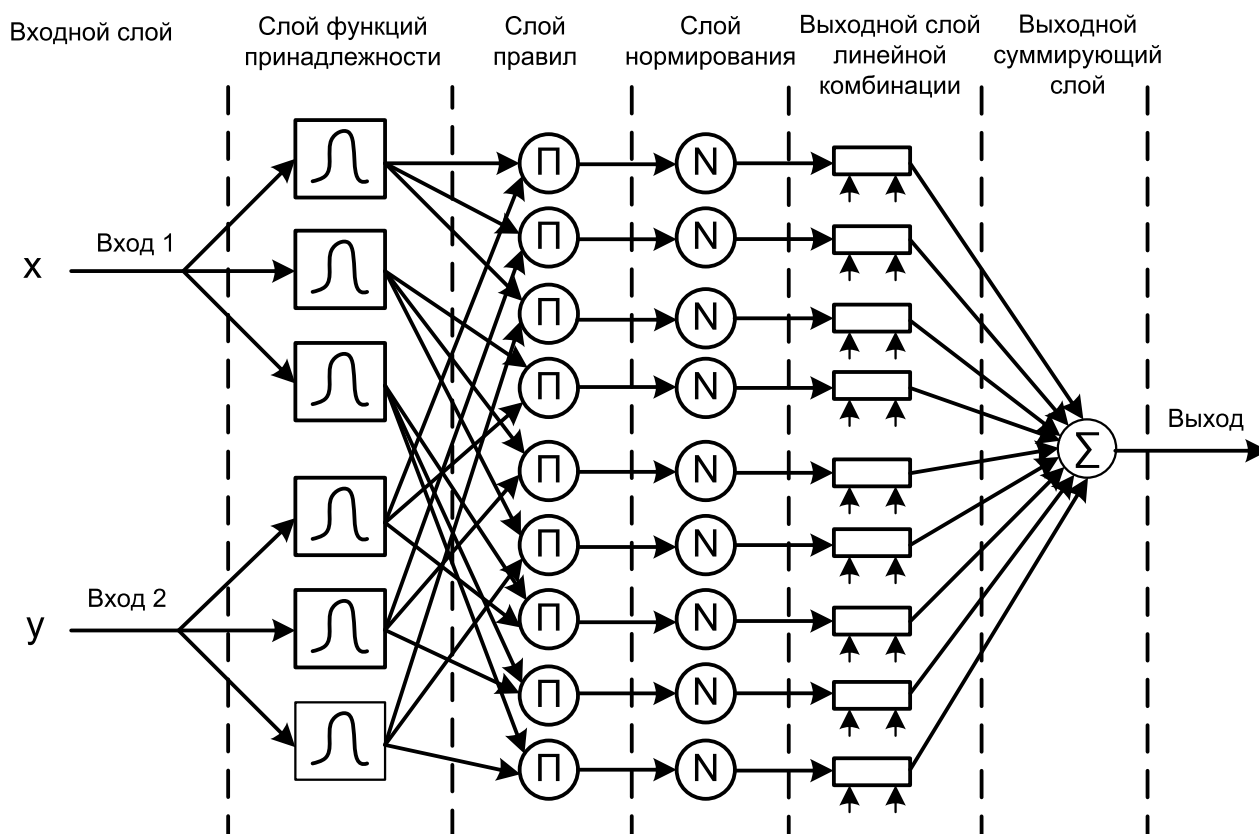


Рис. 7.31. Шестислойная нейро-фаззи-сеть ANFIS архитектуры

Количество входных узлов равно количеству входов фаззи-регулятора, а количество выходов из каждого узла равно количеству функций принадлежности, или термов, которые используются для фаззификации входного вектора данных.

На узлах *слоя функций принадлежности* производится преобразование входных сигналов, так же, как это имеет место в нейронных сетях при преобразовании их *активационной функцией*. При этом каждому значению входного сигнала находится выходное значение, соответствующее выбранной функциональной зависимости формы термов, или функции принадлежности. В фаззи-регуляторе эта процедура соответствует операции фаззификации входных сигналов. Совокупность выходных значений нейронов данного слоя в соответствии с направлениями, указанными стрелками, поступает на нейроны *слоя правил*.

В узлах этого слоя выполняется логическая операция «И», которая в теории фаззи-логики заменяется математической операцией «минимум». На рис. 7.31 узлы этого слоя обозначены буквой «П». Распределение связей между вторым и третьим слоем осуществляется так, чтобы каждый вход сети имел связь с каждым нейроном

третьего слоя, через один из узлов второго слоя. Количество узлов в данном слое равно количеству функций принадлежности, принятых на один вход, в степени числа входов. Так, при двух входах и трех функциях принадлежности число узлов (или нейронов) слоя правил равно  $3^2 = 9$ . Такая сеть обеспечивает заведомо избыточное количество правил, которое практически покрывает все возможные варианты зависимостей данных. Этот слой выполняет операции, которые осуществляются в фаззирегуляторе на этапе логической обработки. В более сложных алгоритмах построения нейро-фаззи-сетей используются методы статистического анализа, для исключения «лишних» правил и функций принадлежности. При этом не требуется выбирать количество и вид функций принадлежности, или термов.

В следующем слое осуществляется *нормирование выходных значений* третьего слоя. На рис. 7.31 нейроны этого слоя отмечены буквой «N». Определение выходных значений этого слоя заключается в нахождении суммы выходов всех узлов слоя правил и делении каждого из выходных значений третьего слоя на это суммарное значение. Этим обеспечивается масштабирование выходных значений, что повышает устойчивость сети.

*Выходной слой линейной комбинации* состоит из узлов, в которых вычисляется выражение вида  $Ax + By + C$ , где коэффициентами являются значения  $A, B, C$ , а входные сигналы обозначены  $x, y$ . Коэффициенты линейной комбинации определяются в результате итерационного процесса, например, по алгоритму обратного распространения ошибки (BACK PROPAGATION). Структурную схему можно упростить, если принять что все коэффициенты равны нулю, кроме свободного члена, обозначенного как  $C$  (система Сугено нулевого порядка).

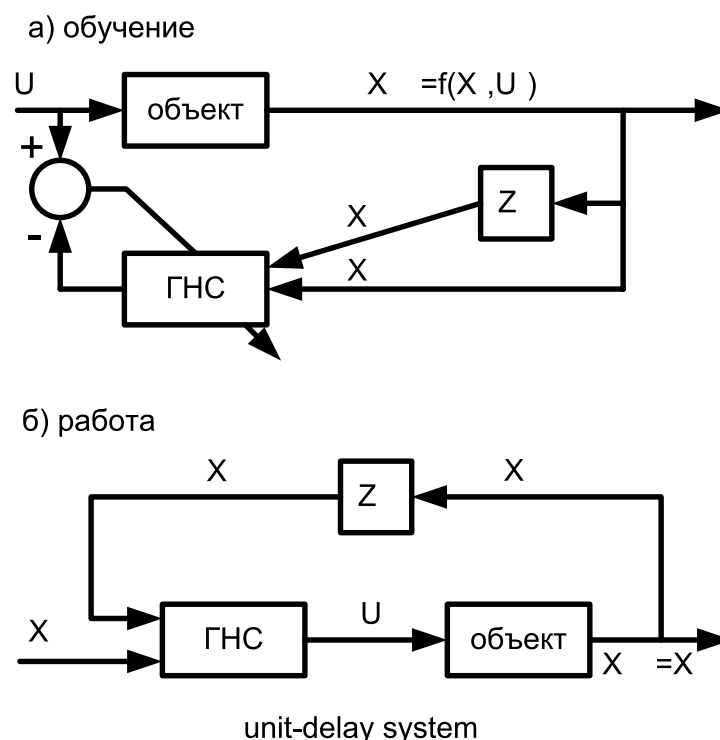
*Выходной суммирующий слой* содержит единственный узел, выполняющий суммирование сигналов – нахождение единственного значения выхода сети. Таким образом, пятый и шестой слой осуществляют операцию, аналогичную операции дефаззификации в фаззи-системе Сугено.

Однако ANFIS – не единственная гибридная нейронная сеть. Известны и другие несколько отличающиеся системы.

Для нахождения параметров нейронной сети нужно сформировать обучающее множество, состоящее из тестового и целевого вектора. *Тестовый вектор* представляет собой совокупность пода-



ваемых последовательно на вход объекта сигналов, отличающихся амплитудой и продолжительностью, вид которых определяется экспериментальным путем. Часто используют прямоугольные импульсы единичной площади. *Целевой вектор* – желаемый выход нейронной сети есть совокупность значений выходной координаты в дискретные моменты времени. Размерности целевого и тестового вектора совпадают. Число тестовых данных устанавливается достаточно большим, чтобы получить качественное представление о динамических свойствах объекта. Для управления электротехническими объектами оказывается эффективным реализовать с помощью ГНС прямую либо инверсную модель объекта. *Прямая модель* – это нейронная сеть, которая повторяет переходной процесс объекта регулирования, являясь своего рода наблюдателем системы. *Инверсная модель* – это нейронная сеть, которая восстанавливает входной сигнал объекта регулирования, при известном выходном сигнале (рис. 7.32 а). Полученные прямая и инверсная модель объекта управления используются для построения системы управления нелинейными динамическими системами.



а – Структурная схема системы в фазе обучения сети;  
б – Структурная схема объекта с нейро-фаззи-регулятором

Рис. 7.32. Схема формирования обратной модели объекта и ее применение

Инверсная модель как бы воспроизводит свойства обратной передаточной функции объекта. Поэтому, будучи введенной в прямой канал управления (рис. 7.32 б), она как бы линеаризует систему управления, реализуя принцип *прямого инверсного управления*.

Добавление линий задержки необходимо чтобы безынерционная по своей природе ГНС получила способность к аппроксимации динамических свойств объекта управления. Причем для адекватной работы статической нейронной сети количество линий задержки должно соответствовать порядку передаточной функции. И хотя представленные схемы отличает простота, иногда лучший результат можно получить, используя более сложные варианты построения системы обучения нейронной сети. В таких схемах часто используется несколько нейронных сетей одновременно, в том числе реализующих прямую модель объекта.

### ***Вопросы для самопроверки***

**?**

1. В чем заключен смысл задачи управления мехатронной системой?
2. Какова иерархическая схема мехатронной системы управления?
3. Какие задачи управления решаются на исполнительном уровне?
4. Какие задачи решаются на тактическом уровне управления?
5. Что такое обратная задача?
6. Какие задачи решаются на стратегическом уровне управления?
7. Каковы достоинства фаззи-систем управления?
8. В каком виде поступает информация для логической обработки после дефаззификации?
9. Каковы этапы преобразования входного сигнала в фаззи-регуляторе и какова их сущность?
10. Что такое «терм»?
11. Какие методы дефаззификации наиболее часто используются?
12. Приведите примеры правил логической обработки. Когда используется оператор *minimum* и когда *maximum*?

13. Каким образом в фаззи-регуляторе можно обеспечить в выходной характеристике:

- увеличение коэффициента усиления;
- зону нечувствительности;
- «выпуклость» и «вогнутость»;
- участки с «падающим» характером выходного сигнала.

14. Каковы технические преимущества компьютерного нейрона перед нейроном человеческого мозга?

15. Что такое «активационная функция»?

16. В чем заключается синтез нейронной сети.

17. В чем сущность метода генетических алгоритмов, каковы его преимущества при синтезе НС?

18. Каковы преимущества гибридных нейронных сетей? Приведите схему простейшей ГНС и поясните значение каждого слоя.

19. Что такое «прямая модель ГНС» и «инверсная модель ГНС»?

20. В чем заключается эффект одновременного использования прямой и инверсной модели ГНС?

## **Список литературы к разделу 7**



1. Архангельский В.И. Нейронные сети в системах автоматизации / В.И. Архангельский, И.Н. Богаенко и др. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.

2. Вороновский Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.

3. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев. – К.: Радіоаматор, 2008. – 972 с.

4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

5. Клепиков В.Б. Влияние фаззи-данных на выходные характеристики фаззи-регулятора / В.Б. Клепиков, О.Ю. Гле-

бов, Ф. Палис // «Технічна електродинаміка»: тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – Київ, 2002. – Ч.6. – С. 43–48.

6. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: учеб. пособие / Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 80 с.

7. Попов Е.П. Основы робототехники / Е.П. Попов, Г.В. Письменный. – М.: Высш. шк., 1990. – 223 с.

8. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електропривод / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – К.: Либідь, 2005. – 678 с.

9. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано и др. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

10. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: учеб. пособие для вузов / И.М. Макаров, В.З. Рахманкулов, В.М. Назаретов и др.; под общ. ред. И.М. Макарова. – М.: Высшая школа, 1986. – 159 с.

11. Робототехника / Ю.Д. Адрианов, Э.П. Бобриков, В.Н. Гончаренко и др.; Под ред. Е.П. Попова, Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 1984. – (Автоматические манипуляторы и робототехнические системы). – 288 с.

12. Системы оцувствлення и адаптивныe промышленные роботы / В.Б. Брагин, Ю.Г. Войлов, Ю.Д. Жаботинский и др.; под общ. ред. Е.П. Попова, В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

13. Управление роботами от ЭВМ / Е.И. Юревич, С.И. Новаченко, В.А. Павлов и др.; Под ред. Е.И. Юревича, – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 264 с.

14. Управляющие и вычислительные устройства роботизированных комплексов на базе микроЭВМ: учеб. пособие для техн. вузов / В.С. Медведев, Г.А. Орлов, Ю.И. Рассадкин и др.; Под ред. В.С. Медведева. – М.: Высш. шк., 1990. – 239 с.

15. Digital Control of Dynamic Systems / Franklin G., Powell J., and Workman M., 3rd Edition, Addison-Wesley, 1998. – 742 pp.

16. Isermann R. Digital Control Systems. Springer-Verlag, New York, 1981.

# CONTENTS

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapter 1 HISTORY OF MECHATRONICS.</b>	
<b>MECHATRONICS AND ELECTRIC DRIVE .....</b>	<b>5</b>
Questions for self-testing .....	11
References for chapter 1 .....	11
<b>Chapter 2 BASIC CONCEPTS AND DEFINITIONS OF</b>	
<b>MECHATRONICS.....</b>	<b>12</b>
2.1 Definitions and terminology of mechatronics.....	12
2.2 Structure and design principles of mechatronic systems .....	17
Questions for self-testing .....	21
References for chapter 2.....	21
<b>Chapter 3 MECHATRONIC SYSTEMS IN VARIOUS</b>	
<b>FIELDS OF PRODUCTION ACTIVITY .....</b>	<b>23</b>
3.1 General classification of robots.....	23
3.2 Classification of industrial robots .....	26
3.3 Robotic systems .....	30
3.4 Mechatronics in medicine .....	37
3.5 Peripherals of computers as mechatronic objects .....	47
3.6 Mechatronic systems in household use .....	49
3.7 Transportation mechatronic systems.....	50
3.8 Special purpose transportation robots .....	75
3.9 Technological machine-hexapods.....	87
Questions for self-testing .....	98
References for chapter 3.....	101
<b>Chapter 4 CONSTRUCTION METHODS OF</b>	
<b>MECHATRONIC MODULES AND SYSTEMS .....</b>	<b>104</b>
4.1 Design principles of mechatronic systems.....	104
4.2 Elimination method of booster converters and	
interfaces .....	113
4.3 Method of integration of mechatronic unit components.....	121
4.4 Method of transfer of functional load on intelligent	
devices.....	125
Questions for self-testing .....	128
References for chapter 4.....	129

<b>Chapter 5 MECHATRONIC MODULES .....</b>	<b>130</b>
5.1 Systematics of mechatronic modules .....	130
5.2 Motion transducer .....	132
5.3 Slideways .....	138
5.4 Brake and takeup mechanisms .....	142
5.5 Electric motors of mechatronic units .....	150
5.6 Force transducers.....	154
5.7 Microintegrated systems .....	159
5.8 Integration of mechatronic units .....	172
5.9 Micromechatronic devices .....	187
Questions for self-testing .....	195
References for chapter 5.....	197
<b>Chapter 6 INFORMATION DEVICES OF MECHATRONIC SYSTEMS.....</b>	<b>199</b>
6.1. Position sensors .....	199
6.2. Velocity sensors .....	204
6.3. Sensors of technological parameters .....	207
Questions for self-testing .....	212
References for chapter 6.....	212
<b>Chapter 7 MODERN METHODS OF CONTROL FOR MECHATRONIC UNITS AND SYSTEMS .....</b>	<b>213</b>
7.1 Problem statement of mechatronic system control .....	213
7.2 Control hierarchy in mechatronic systems .....	217
7.3 Control systems of executive, tactical, and strategic levels .....	221
7.4 Intelligent control methods .....	227
Questions for self-testing .....	257
References for chapter 7.....	258

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОНИКИ. МЕХАТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД .....</b>	<b>5</b>
Вопросы для самопроверки.....	7
Список литературы к разделу 1 .....	7
<b>Глава 2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАТРОНИКИ.....</b>	<b>12</b>
2.1 Определения и терминология мехатроники .....	12
2.2 Структура и принципы построения мехатронных систем .....	17
Вопросы для самопроверки.....	21
Список литературы к разделу 2 .....	21
<b>Глава 3 МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....</b>	<b>23</b>
3.1 Общая классификация роботов .....	23
3.2 Классификация промышленных роботов .....	26
3.3 Робототехнические комплексы.....	30
3.4 Мехатроника в медицине .....	37
3.5 Периферийные устройства компьютеров как мехатронные объекты .....	47
3.6 Мехатронные системы в быту .....	49
3.7 Транспортные мехатронные системы .....	50
3.8 Транспортные роботы специального назначения .....	75
3.9 Технологические машины-гексаподы.....	87
Вопросы для самопроверки.....	98
Список литературы к разделу 3 .....	101
<b>Глава 4 МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И СИСТЕМ.....</b>	<b>104</b>
4.1 Основы конструирования мехатронных систем .....	104
4.2 Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов .....	113
4.3 Метод объединения элементов мехатронного модуля.....	121
4.4 Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства .....	125

Вопросы для самопроверки.....	128
Список литературы к разделу 4 .....	129
<b>Глава 5 МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ .....</b>	<b>130</b>
5.1 Систематика мехатронных модулей .....	130
5.2 Преобразователи движения .....	132
5.3 Направляющие.....	138
5.4 Тормозные устройства и механизмы для выборки люфтов .....	142
5.5 Электродвигатели мехатронных модулей .....	150
5.6 Силовые преобразователи .....	154
5.7 Микропроцессорные системы управления .....	159
5.8 Интеграция мехатронных модулей .....	172
5.9 Микромехатронные устройства.....	187
Вопросы для самопроверки.....	195
Список литературы к разделу 5 .....	197
<b>Глава 6 ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ.....</b>	<b>199</b>
6.1. Датчики положения .....	199
6.2. Датчики скорости .....	204
6.3. Датчики технологических параметров.....	207
Вопросы для самопроверки.....	212
Список литературы к разделу 6 .....	212
<b>Глава 7 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ .....</b>	<b>213</b>
7.1 Постановка задачи управления мехатронными системами .....	213
7.2 Иерархия управления в мехатронных системах .....	217
7.3 Системы управления исполнительного, тактического и стратегического уровней .....	221
7.4 Интеллектуальные методы управления .....	227
Вопросы для самопроверки.....	257
Список литературы к разделу 7 .....	258



Навчальне видання

ГРАБЧЕНКО Анатолій Іванович  
КЛЕПІКОВ Володимир Борисович  
ДОБРОСКОК Володимир Ленінмирович  
КРИЖНИЙ Григорій Кирилович  
АНИЩЕНКО Микола Васильович  
КУТОВОЙ Юрій Миколайович  
ПШЕНИЧНИКОВ Дмитро Олексійович  
ГАРАЩЕНКО Ярослав Миколайович

## **ВВЕДЕНИЕ В МЕХАТРОНИКУ**

***Навчальний посібник***

(російською мовою)

Відповідальний за випуск *А.И. Грабченко*

В авторській редакції

Пособие подготовлено в рамках объединенного европейского проекта по программе Темпус IV „Программа двойных дипломов ЕС и стран-партнеров по подготовке магистров в области автоматизации и мехатроники“.

Проект финансируется при поддержке Европейской Комиссии. Содержание данной публикации/материала является предметом ответственности автора и не отражает точку зрения Европейской Комиссии.

The manual is prepared in the framework of the joint European project Tempus IV "EU-PC double degree master program in automation/mechatronics".

Project co-financed by the European Commission. The contents of this publication/material is the sole responsibility of the authors and do not reflect the views of the European Commission.



Tempus