

ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

А.В. Титенок

**РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
И БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

**Брянск 2016**

УДК 681.5

ББК 34.4

T45

Титенок, А.В. Развитие инновационной техники для повышения эффективности и безопасности труда: монография/А.В. Титенок. – Брянск: Брянский ГАУ, 2016. – 216 с.

**ISBN978-5-88517-263-9**

Монография предназначена для специалистов в области различных транспортно-технологических процессов и средств их реализации.

Монография будет полезной и студентам всех форм обучения: по специальности 190205 "Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование" (квалификация "инженер"); направлениям подготовки: 190109 "Наземные транспортно-технологические средства" (квалификация "специалист"); 190100 "Наземные транспортно-технологические комплексы" (квалификация "бакалавр"); 280700 "Техносферная безопасность" профиль "Безопасность технологических процессов и производств" (квалификация "бакалавр").

В монографии рассмотрены этапы эволюции и основные схемы, приведены технические характеристики и системы управления, а также сведения о механизмах и устройствах новой техники.

**ISBN 978-5-88517-263-9**

Рецензенты: д.т.н., академик РАЕН Аксютенков В.Т.;

директор ООО "РТС-ЛИФТ" Карпенков А.И.

© Титенок, А.В., 2016

© Брянский ГАУ, 2016

## Введение

Известно, что одним из важных направлений автоматизации производственных процессов является внедрение промышленных роботов (ПР), что эффективно в условиях многономенклатурного производства с характерной для него частой сменой выпускаемых изделий. При механической обработке деталей с использованием ПР автоматизируют: установку заготовок в рабочую зону станка и контроль правильности их базирования, снятие обработанных заготовок со станка и размещение их в накопителе, передачу заготовок от станка к станку, кантование заготовок в процессе обработки, смену инструментов. Область применения ПР определяется компоновкой, зависящей от способа его установки на рабочем месте, типа системы координат, в которой он работает, числа степеней подвижности и состава движений ПР, числа рук и схватов на руке.

Характеристики заготовок оказывают влияние на технологическую структуру. Вид заготовки влияет на конструкцию вспомогательных устройств и схвата ПР. Масса заготовки и готовой детали влияет на выбор ПР по критериям грузоподъемности и конструкции хватного устройства. Материал заготовки определяет тип и конструкцию ЗУ. Качество рабочей поверхности влияет на конструкцию губок схвата. Конструкция и габариты заготовки определяют конструкцию ЗУ и влияют на выбор модели ПР.

## Интегральный закон изменений в синергетических системах (интегральный закон Титенка А.В.)

Выполненные автором исследования [1...21] стали основой для открытого им *интегрального закона изменений в синергетических системах*: "Единство окружающей среды и существующей в ней системы образует взаимодействие двух полярностей – это ряды парных значимых факторов, характеризующие управляющее воздействие окружающей среды на систему, отклик системы на это воздействие и выражающие форму системных изменений: прогрессивную или регрессивную; эволюционную или революционную; коэволюционную или катастрофическую".

Модель интегрального закона сформирована следующим образом.

Научная проблема заключалась в ограниченности концепции процесса создания новшеств для производственных процессов. В основу был положен частный случай. Это материализация новизны, как объекта производства, что базируется на законе материализации результатов мыслительных процессов (автор – А.Т.). Смысл его в том, что антропотехническая материализация (АМ) функционально зависит от ряда факторов: наличие потребности (П) в удовлетворении естественных человеческих потребностей путем материализации и применения искусственных средств и методов труда; количество и качество труда (Т), вложенного в процесс удовлетворения потребностей; результат осознания (О) сущности проблемы и методов удовлетворения появившихся потребностей; появление и развитие условий (У), для удовлетворения этих новых потребностей. В общем:

$$AM = f(\Pi, T, O, Y), \quad (1)$$

или в виде модели<sup>1</sup>

$$AM = \int_0^{[\Pi]} d\Pi + \int_0^{[T]} dT + \int_0^{[O]} dO + \int_0^{[Y]} dY, \quad (2)$$

где [П] – наличие проблемы, т.е. предельное состояние потребности удовлетворения естественных потребностей (П) путем материализации и применения искусственных средств и методов труда: ситуация, при которой

---

<sup>1</sup>**Примечание:** в этом конкретном случае интеграл (лат. integer – целый, восстановленный) следует рассматривать не с точки зрения количественного исчисления, а как качественную аналитическую операцию, содержание которой составляет накопление потенциалов для перехода некоторого совершенно определенного типа факторов (П, Т, О, У) к такому их предельному состоянию {[П], [Т], [О], [У]}, при котором возможна материализация искусственного объекта и его эволюция; математика постепенно проникнет в область неопределенности человеческой деятельности, так как она является единственным инструментом, позволяющим проще объяснить многое то, что сложнее четко выразить словами.

без создания нового или, по крайней мере, без изменения объекта или процесса человек или сообщество ощущает себя вне физического или духовного комфорта; [Т] – основное условие человеческой жизни – труд (Т), достаточное в количественно-качественном отношении для процесса материализации технического объекта или системы; [О] – предельное состояние творческой личности или коллектива в понимании сущности проблемы, завершающееся осознанием (О) проблемы, изобретением, открытием или новой теорией, которые, в свою очередь являются не осознанием, а результатом осознания; [У] – минимальное качественно-количественное наличие условий (У), позволяющих усовершенствовать известный или создать новый объект или систему (совокупность объектов, направленных на выполнение общей функции), посредством которых можно устранить проявившуюся проблему: наличие разработанного технологического процесса и средств труда, потенциально позволяющих материализовать новое;  $d\Pi, dT, dO, dY$  – это соответствующие приращения, прибывающие с течением времени – ступени развития творческой личности и коллектива, занимающихся разрешением возникшей проблемы.

Если хотя бы одна из составляющих этой схемы не достигнет своего предельного значения, при котором возможна планируемая материализация, то её не будет. Следовательно, антропотехническая материализация (АМ) допустима, если  $AM \rightarrow [AM]$  при наличии суммы необходимых и достаточных для этого процесса факторов, когда  $T \rightarrow [T]; O \rightarrow [O]; P \rightarrow [P]; Y \rightarrow [Y]$ . Модель процесса физического воплощения в жизнь новых искусственно созданных объектов или явлений принимает вид

$$[AM] = [\Pi] + [T] + [O] + [Y], \quad (3)$$

что следует считать необходимыми и обязательными условиями.

Эта схема в математической формуле отражает закон материализации результата мыслительных процессов: *создание новшества обусловлено материально-техническим и научным потенциалом общества на конкретном этапе развития цивилизации, результатом человеческой деятельности и осознанной необходимостью, вытекающими из понимания сущности проблемы, явлений природы, процессов взаимодействия человека с окружающей его средой и предметами труда.*

Смысл закона в осознании и раскрытии источников творчества.

Идеализироваться могут не только отдельные свойства, но и сущностные отношения, поэтому в данном случае сознательно применена идеализация явления, сформулированного в виде закона материализации результата мыслительных процессов. Идеализация закона в отличие от идеализации свойств допускает предельный случай сущностных отношений, который в реальной действительности никогда полностью не осуществляется. Логической формой этого типа идеализации является не понятие, а суждение. Мера идеализации пока полностью не раскрыта из-за неопределенно-

сти меры осознания, предшествующего открытию или изобретению новшества, поэтому представлена безразмерной величиной абсолютной ограниченной шкалы от 0 до 1.

На заре цивилизации, когда человек прямоходящий (*homo erektus*) занимал промежуточную ступень между животными и человеком умелым (*homo habilis*), не имеет смысла говорить об осознанной трудовой деятельности, следовательно, схема материализации (**М**) искусственных объектов может быть представлена в виде

$$[\mathbf{M}] = [\mathbf{И}] + [\mathbf{П}] + [\mathbf{У}], \quad (4)$$

где  $[\mathbf{И}] \neq [\mathbf{T}] + [\mathbf{О}]$  и проявляется лишь в качестве инстинкта.

Эта формула отражает возможность, природой предоставленную живому миру, когда создаются гнезда, берлоги, норы и т.п. Используя ту же возможность, начал свое развитие *homo habilis*, постепенно превращаясь в человека разумного (*homo sapiens*).

В более поздний период, в сравнении с тем, что отражено формулой (3), т.е. в современных цивилизованных условиях существования человека, процесс появления новшеств (**МЦ**) целесообразно рассматривать в виде

$$[\mathbf{МЦ}] = [\mathbf{П}] + [\mathbf{T}] + [\mathbf{О}] + [\mathbf{Н}], \quad (5)$$

где  $[\mathbf{Н}]$  учитывает научную организацию труда – наличие и рациональное использование квалифицированных специалистов, различного вида ресурсов и оборудования, достоверной и научно-обоснованной информации.

С течением времени объект или система эволюционируют в форме функциональных последовательностей или рядов, что геометрически представлено совмещением (наложением) гармоник, количество  $\alpha$  которых изменяется с течением времени, как функция события в зависимости от времени  $f(t)$ . Для примера предложенные выше схемы (3) и (5) могут принять вид, который можно представить рядом Тейлора:

$$[\mathbf{AM}] = (\alpha!)^{-1} \{ [\mathbf{П}^\alpha] + [\mathbf{T}^\alpha] + [\mathbf{О}^\alpha] + [\mathbf{У}^\alpha] \}, \quad (6)$$

$$[\mathbf{МЦ}] = (\alpha!)^{-1} \{ [\mathbf{П}^\alpha] + [\mathbf{T}^\alpha] + [\mathbf{О}^\alpha] + [\mathbf{Н}^\alpha] \}. \quad (7)$$

Изложенное выше обосновало *производственную концепцию закона (А.Т.): производство предметов труда (ПТ) в зрелых условиях (У<sub>з</sub>) человеческого сообщества может быть обеспечено наличием витальной (жизненно необходимой) потребности (П<sub>в</sub>) в них при интеллектуальной (И<sub>А</sub>) и трудовой (Т<sub>А</sub>) активности творящего коллектива:*

$$ПТ = f[(П_{в}, У_{з}); (И_{А}, Т_{А})]. \quad (8)$$

Имеем *две пары факторов*. Первая пара – это потребности в конкретном предмете труда и условия, необходимые для его создания. Вторая пара – это трудовая активность работающего коллектива и интеллектуальная ак-

тивность творческих личностей. Под интеллектом следует понимать биологический механизм для образования и анализа системы знаний, а под трудовой активностью – процесс человеческой деятельности, результатом которого является материальная продукция.

В процессе и условиях длительного совершенствования *эволюция происходит под воздействием положительных и отрицательных значимых факторов*. Так как действию сопутствует его противоположность, то эти факторы парные. Причем, системно действуют они длительное время, следовательно, являются напряженными для объекта эволюции. В этой связи модель эволюции Э объекта или системы принимает вид (А.Т.):

$$\mathcal{E} = (\alpha!)^{-1} \{[(\pm\Phi_1)^\alpha + (\pm\Phi_2)^\alpha] + \dots + [(\pm\Phi_{(n-1)})^\alpha + (\pm\Phi_{(n)})^\alpha]\}, \quad (9)$$

где  $\Phi_1 \dots \Phi_n$  – значимые факторы, входящие в пару со своими знаками.

*Историко-технический аспект полученной модели*: совершенствование объектов и систем – это итерационная последовательность операций (в модели – результат неоднократно повторяемого применения какой-либо математической операции, например, образование новой функции из данной функции) и композиция или суперпозиция функций  $\{U[P[O[T(x_0)]]]\}$ . Совершенствование (в положительном смысле) объекта, технологического процесса, целой отрасли и даже страны или мироздания теоретически соответствует их идеализации.

*Ценность модели с позиции математики*: зная последовательность простых применяемых операций процесса совершенствования, мы можем выразить его конечный результат через известную простую формулу, для которой имеются данные относительно ее числового и графического выражения. Это понятийный инструмент. Избранный метод позволяет проследить ретроспективные этапы развития объекта исследования – изменения его формы и содержания, а также учесть уроки истории в перспективе (*фр. perspective; лат. perspicere – насквозь видеть, внимательно рассматривать*) – в будущем, впереди.

*Теоретическая значимость интегрального закона*: моделирование и исследование изменений синергетических систем показало, что явление это закономерное, предсказуемое и может быть контролируемым.

*Практическая ценность закона* подтверждена исследованиями, выполненными автором по теме: "Политика и техническое развитие страны" на примере процесса механизации агропромышленной отрасли. Выполнен анализ отраслевых изменений; введено понятие коэффициента катастроф  $K$  для исторических отрезков времени, негативно отражающих отраслевое развитие. Так, если для конкретного исторического периода  $K \rightarrow 100\%$ , то технологию производства технических средства механизации и автоматизации производственных процессов за этот период можно охарактеризовать как "отверточную", т.е. – основанную на сборке изделий, элементы которых имеют импортную природу.

## Основные понятия

**Производственным** (промышленным) **роботом** (ПР) назовём стационарную или мобильную автоматическую машину, управляемую компьютером и способную выполнять различные рабочие операции посредством манипулятора (М).

**Манипулятор** – это механическая рука, выполняющая функции, аналогичные функциям человеческой руки, управляемая оператором или действующая автоматически.

**Робототехника** – область науки и техники, ориентированная на улучшение условий труда человека и связанная с созданием, исследованием и применением роботов.

**Цель робототехники** – создание и применение роботов для их использования в робототехнических системах разного назначения.

Современная робототехника возникла на основе синтеза механики и кибернетики. Для механики это связано с развитием многозвенных механизмов типа манипуляторов, а для кибернетики – с развитием интеллектуального управления этими механизмами. В этом развитии заключаются **задачи робототехники**.

Главными отличительными чертами роботов от традиционных средств автоматизации являются гибкость, адаптивность, интеллектуальность и универсальность.

**Гибкость роботов** – это способность их управляющей системы быстро перестраиваться на выполнение новых операций путем перепрограммирования движений роботов в режиме обучения их управляющей системы.

**Адаптивность роботов** характеризуется способностью быстро реагировать на внешние и внутренние возмущения и автоматически приспосабливаться к изменяющимся условиям функционирования. Эту способность определяют, прежде всего, средствами их "очувствления", т.е. количеством и характеристиками датчиков внутренней и внешней информации, а также алгоритмическим и программным обеспечением самонастройки (адаптации) управляющей системы.

**Интеллектуальность роботов** заключается в их способностях решать задачи интеллектуального характера: анализ сложных изображений и сцен, распознавание образов, планирование движений и операций, диагностика состояний и т. п.

**Универсальность** (многофункциональность) **роботов** позволяет решать не одну, а целый класс производственных задач.

### **Термины и определения (ГОСТ 25686-85):**

**Технологический промышленный робот** – промышленный робот для выполнения технологических переходов, операций, процессов, оснащенный рабочим или измерительным инструментом.

*Вспомогательный промышленный робот* – промышленный робот для обслуживания технологического оборудования, перемещения объектов, оснащенный захватным устройством.

*Специальный робот* – робот для выполнения одной операции одного вида.

*Специализированный робот* – робот для выполнения различных операций одного вида.

*Универсальный робот* – робот для выполнения различных операций различных видов.

*Жесткопрограммируемый робот* – робот, управляющая программа которого, введенная на этапе программирования, не может быть изменена в процессе работы в зависимости от функционирования робота и контролируемых параметров рабочей среды.

*Адаптивный робот* – робот, управляющая программа которого может автоматически меняться в процессе работы в зависимости от функционирования робота и (или) контролируемых параметров рабочей среды. Не следует смешивать понятия "*адаптивный робот*" и "*очувствленный робот*", который, обладая датчиками внешней информации, может не иметь средств автоматического изменения управляющей программы в процессе функционирования.

*Интеллектуальный робот* – робот, управляющая программа которого может полностью или частично формироваться автоматически в соответствии с поставленным заданием и в зависимости от состояния рабочей среды.

*Манипуляционный робот* – робот для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека.

*Стационарный манипуляционный робот* – манипуляционный робот, закрепленный на неподвижном основании.

*Мобильный робот* – робот, способный перемещаться в рабочей среде в соответствии с управляющей программой. Мобильный робот может быть снабжен манипулятором. К мобильным роботам не относятся передвижные манипуляционные роботы, которые могут быть оперативно перемещены в рабочей среде вручную или при помощи транспортных средств с ручным управлением.

## 1. Общие сведения о новом типе техники

### 1.1. Ретроспектива промышленных роботов

Применительно к промышленности слово "робот" впервые использовал чешский драматург Карел Чапек (рис. 1.1) в своей фантастической пьесе "Россумовские универсальные роботы" – 1920 г.



Рис. 1.1. Карел Чапек

Пьеса Карела Чапека пробудила всеобщий интерес к роботам. Начался настоящий бум роботизации, но "первыми роботами" были литературные герои. Здесь четко проявляется *закономерность* о материализации технических объектов.

В начале 20-го века наметился прогресс в создании роботов того вида, который характерен для них сейчас. Об этом свидетельствует и появление самого понятия "робот". Оно происходит от чешского слова *robot*, что озна-

чает принудительный труд. В английский язык это слово пришло из пьесы Карела Чапека, впервые показанной на сцене в 1921 г. Пьеса рассказывала о некоем Россуме, основателе фабрики, на которой изготавливались андрониды, отличавшиеся чрезвычайно высокой работоспособностью. Это были первые литературные роботы.

В пьесе Чапека роботы вначале пользуются большим спросом у промышленников, которые приобретают их для работы на своих предприятиях. Но благоденствие длится недолго. Роботы все более совершенствуются, даже приобретают способность самостоятельно мыслить, оставаясь в то же время абсолютно "бездушными". Впоследствии они восстанут против своих хозяев, и победят их.

Сложилось представление о том, что роботы отличаются одной общей чертой: они горят желанием причинять зло людям. Один из персонажей пьесы Чапека высказывается о преимуществах роботов перед людьми: "Один робот заменяет двух с половиной рабочих. Человеческий механизм чрезвычайно несовершенен. Рано или поздно его нужно было заменить". Предводитель роботов Радий в заключение заявляет: "Власть человека пала. Захватив комбинат, мы стали владыками всего... Наступила новая эра! Власть роботов!". Многие другие роботы, встречавшиеся на страницах научно-фантастических произведений в середине 20-го века, вели себя столь же недружелюбно по отношению к людям. Такими были первые роботы – литературные.

*Робот – друг или враг? Роботы, которые в свое время было принято изображать в виде механических созданий, враждебных человеку, появились сейчас в цехах производственных предприятий, освобождая рабочих от многих утомительных операций.*

Проблемой создания человекоподобных механизмов ученые и инженеры всерьез заинтересовались в 50-х годах 20-го столетия. С самого начала в центре внимания исследователей находились вопросы построения машин, способных, подобно рабочему выполнять разнообразные технологические операции на производстве.

Здесь проявляется **закономерность** копирования действий человека при создании технических средств. Это, известное в истории науки и техники явление, позволяет делать выводы о начальной стадии процесса эволюции робототехники.

Роботы, более 50 лет существовавшие лишь в воображении писателей-фантастов, настойчиво вторгаются в повседневную жизнь. На производственных предприятиях развитых стран прижились поколения промышленных роботов. Они позволяют эффективно выполнять самые разнообразные технологические операции, связанные с перемещениями обрабатываемых объектов и решением широкого спектра задач.

В 1958 г. американская фирма "Пленит корпорейшен оф лансинг" изготовила одну из первых моделей механической руки, названной планоботом. Назначение этой руки – загрузка и разгрузка станков. Рука имела 45

программируемых положений кисти и запястья. В 1961 г. фирма "Дженерал электрик" изготовила хардимена (стойкого человека), который мог поднимать и переносить груз до 453,6 кг. Первые роботы марки "Версантран" были выпущены фирмой "Америкэн мэшин энд фаундри" в 1962 г. в США.

Одновременно возник термин "промышленный робот" (ПР), предложенный этой фирмой. В то же время в США появились роботы "Юнимейт-1900", которые получили применение в автомобильной промышленности. Впоследствии появились роботы в других странах: СССР (ЭНИКМАШ) – 1966 г.; Великобритания (1967 г.); Швеция и Япония (1968 г.); ФРГ (1971 г.); Франция (1972 г.); Италия (1973 г.).

Вместе с этим появились первые дистанционно управляемые руки – телехирики. В 1970...75 гг. появились мобильные автооператоры с элементами искусственного интеллекта, управляемые от ЭВМ.

Все эти данные – пример проявления *закономерности* одновременного появления схожих технических средств в разных странах.

## 1.2. Этапы роботизации и поколения роботов

*Первый* этап роботизации начался в 1968 г. с применением микропроцессоров для управления роботами и быстро закончился из-за ненадежности и несовершенства роботов первого поколения.

*Второй* этап связан с появлением адаптивных роботов в 1972 г., когда возможности робототехники начали расширяться.

Появление в 1980 г. роботов с элементами искусственного интеллекта (ИИ) стало началом *третьего* этапа развития промышленной робототехники.

*По типу системы управления* (уровню вводимой информации и способу обучения) *роботы классифицируют как программные, адаптивные и интеллектуальные*. В соответствии с этим классификационным признаком, в зависимости от степени совершенства, все известные конструкции упомянутых выше устройств можно сгруппировать следующим образом.

*Ручные манипуляторы*. Это разнообразные промышленные манипуляторы, приводимые в действие вручную.

*ПР с жестким циклом операций*. Состав и последовательность действий робота задаются априорно для каждой технологической операции в соответствии с предварительной информацией об организации рабочего места. Внесение необходимых корректив в первоначальную последовательность действий, обусловленных происшедшими изменениями в организации рабочего места, требует очень больших затрат труда и времени.

*ПР с перепрограммируемым циклом операций*. Здесь предусмотрены специальные средства, позволяющие легко изменять последовательность действий робота при изменении внешних условий, а также при переходе от одной технологической операции к другой.

*ПР, программируемые методом обучения*. Перед началом работы

человек-оператор в режиме обучения вручную проводит схват робота по рабочей траектории I-го рабочего цикла. При этом в запоминающее устройство системы управления роботом автоматически записываются координаты узловых точек рабочей траектории, а также некоторая информация о состоянии робототехнической системы в процессе выполнения технологической операции.

Такой робот состоит из двух основных частей: *механической руки* и *системы управления* – рис. 1.2. После этого система управления роботом переводится в рабочий режим, записанная в памяти информация подается на приводы исполнительной системы и манипулятор выполняет заданную последовательность действий требуемое количество раз.

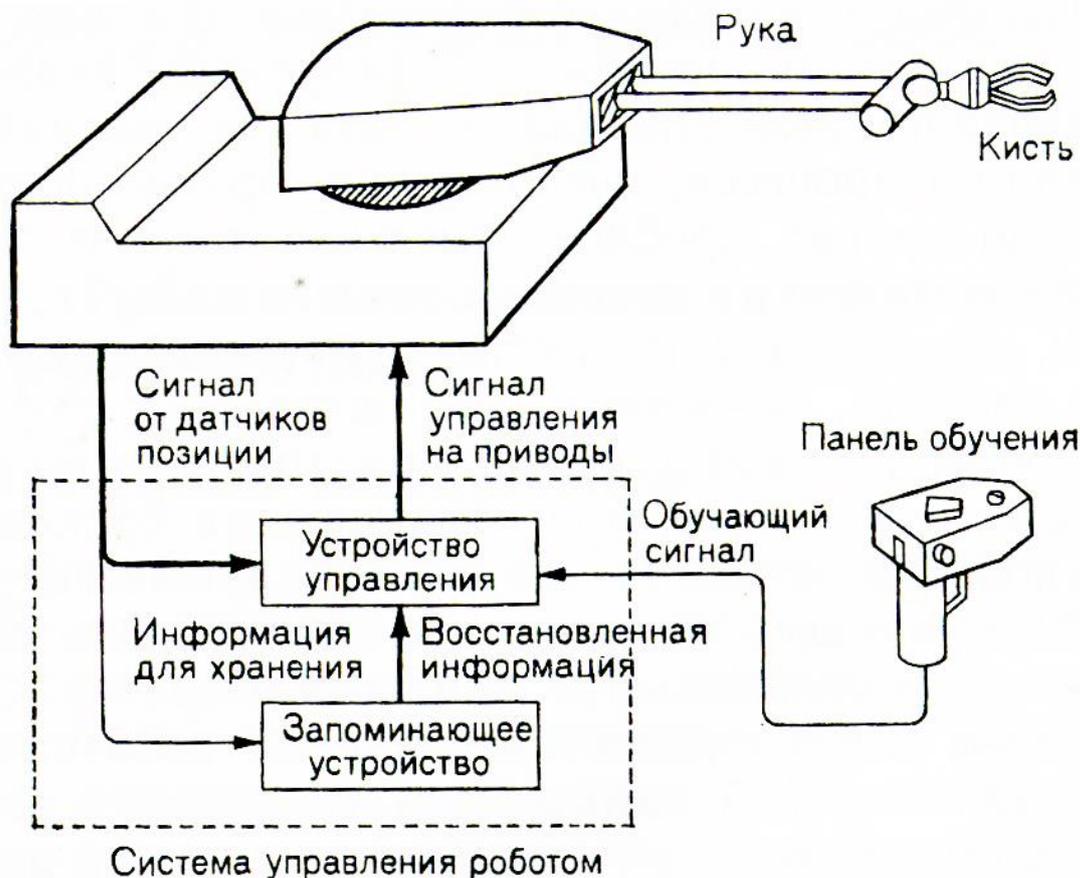


Рис. 1.2. Устройство ПР, программируемого обучением по I-му циклу

**ПР с числовым программным управлением (ЧПУ).** Информация о рабочей траектории и о действиях, которые должны выполняться при движении манипулятора по этой траектории, хранится и обрабатывается в числовой форме. На основе числовой информации формируются управляющие сигналы на приводы исполнительной системы манипулятора.

**ПР с элементами искусственного интеллекта (ИИ).** Такие роботы могут самостоятельно формировать последовательность операций, необ-

ходимую для выполнения заданной работы, используя искусственные органы зрения и осязания.

На первых порах промышленные роботы разрабатывались с единственной целью – заменить человека во вредных и опасных условиях среды, освободить его от тяжелого монотонного труда.

По мере совершенствования роботов их все чаще начинают внедрять в самых разнообразных отраслях промышленности для повышения производительности труда и увеличения объема производств. С позиции ученых, занятых построением систем переработки информации, робот – это механизм, наделенный "разумом" обычного человека.

Такой под ход положил начало новому направлению исследований, который называется искусственным интеллектом. Принципы науки об искусственном разуме используются при создании так называемых интеллектуальных роботов. Давайте проведем сравнение устройства интеллектуального робота с организмом человека. Головной мозг робота – это мощная вычислительная машина (рис. 1.3).

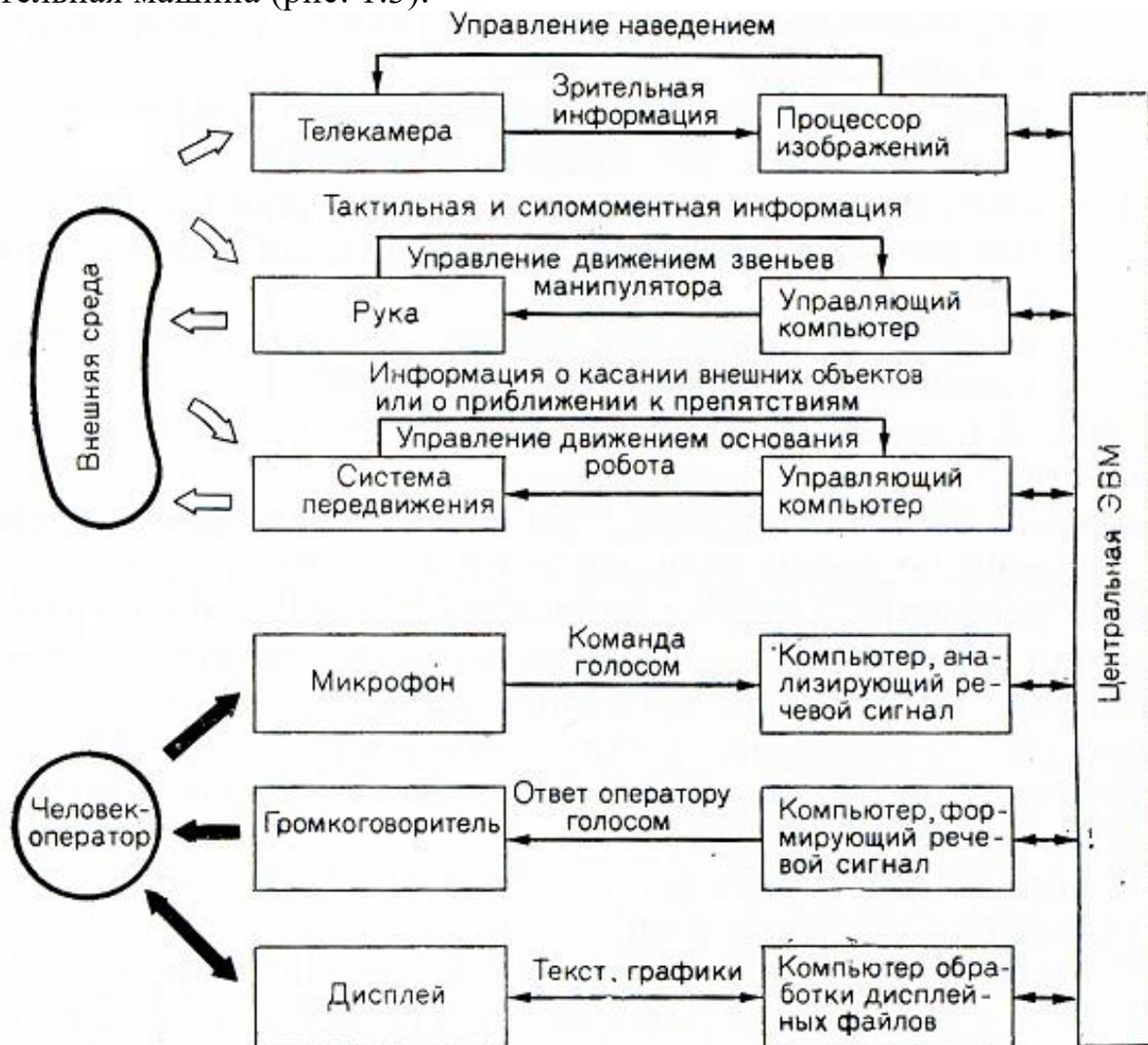


Рис. 1.3. Структура аппаратных средств интеллектуального робота

С центральной ЭВМ связано множество разнообразных устройств которые по своим функциям аналогичны соответствующим органам человека. На рис. 1.4 показана схема общего вида интеллектуального ПР. Сопоставим органы и устройства следующим образом:

- головной мозг – центральная ЭВМ;
- глаза – телекамеры, дистанционная измерительная система и система распознавания изображений (процессор изображений);
- уши – микрофоны, управляемая ЭВМ система подавления шумов и выделения информационного звукового сигнала;
- рот – микрофоны, управляемая ЭВМ система формирования информационных звуковых сигналов;
- многозвенные механические руки робота, разнообразные сенсоры, компьютер, управляющий перемещениями руки;
- ноги – колеса, многозвенные опоры, сенсоры, компьютер, управляющий движением робота.

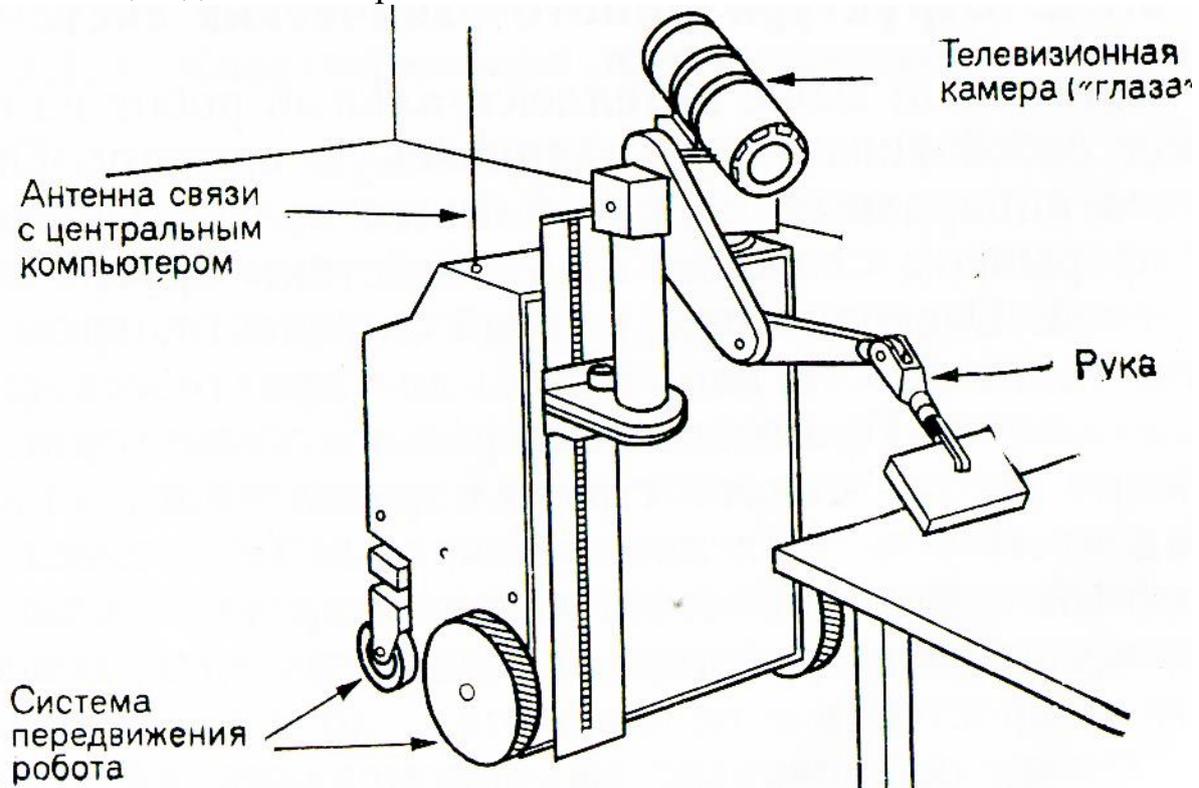


Рис. 1.4. Схема общего вида интеллектуального промышленного робота

Надежды создать на основе одних только аппаратных средств роботов, близкий по своим возможностям к возможностям человека, оказались тщетными. Только с помощью сложнейшего программного обеспечения робот постепенно шаг за шагом овладевает человеческими навыками. В настоящее время программное обеспечение играет основную роль в оснащении робототехнических систем. Именно соответствующие программы наделяют роботов необходимыми способностями:

- Воспринимать приказы, которые оператор подает голосом.
- Формировать план выполнения полученного приказа.
- Ориентироваться в рабочем пространстве с помощью искусственных органов зрения и осязания.
- Исполнять порученную работу с помощью механических рук и ног.
- Эффективно применять знания, полученные в процессе выполнения всех предыдущих заданий.

Интеллектуальный робот представляет собой гигантскую техническую систему со специфической структурой (рис 1.5). Она состоит из комплекса аппаратных и программных средств, которые находятся в непрерывном сложном взаимодействии друг с другом и с внешней средой. Очевидно ввиду своей сложности, громоздкости и дороговизны такие роботы непригодны для практического применения на производстве. ПР обычно ориентированы на выполнение ограниченного строго определенного класса операций при заданных условиях внешней среды.

Тем не менее, понятие "промышленный робот" является очень широким. Оно включает в себя все многообразие роботов, от самых дешевых, способных выполнять лишь простейшие перемещения, до современных роботов высокого класса, оснащенных микрокомпьютерами, обладающих органами искусственного зрения и умеющих автоматически выбирать нужную рабочую программу, основываясь на показаниях информационных датчиков.

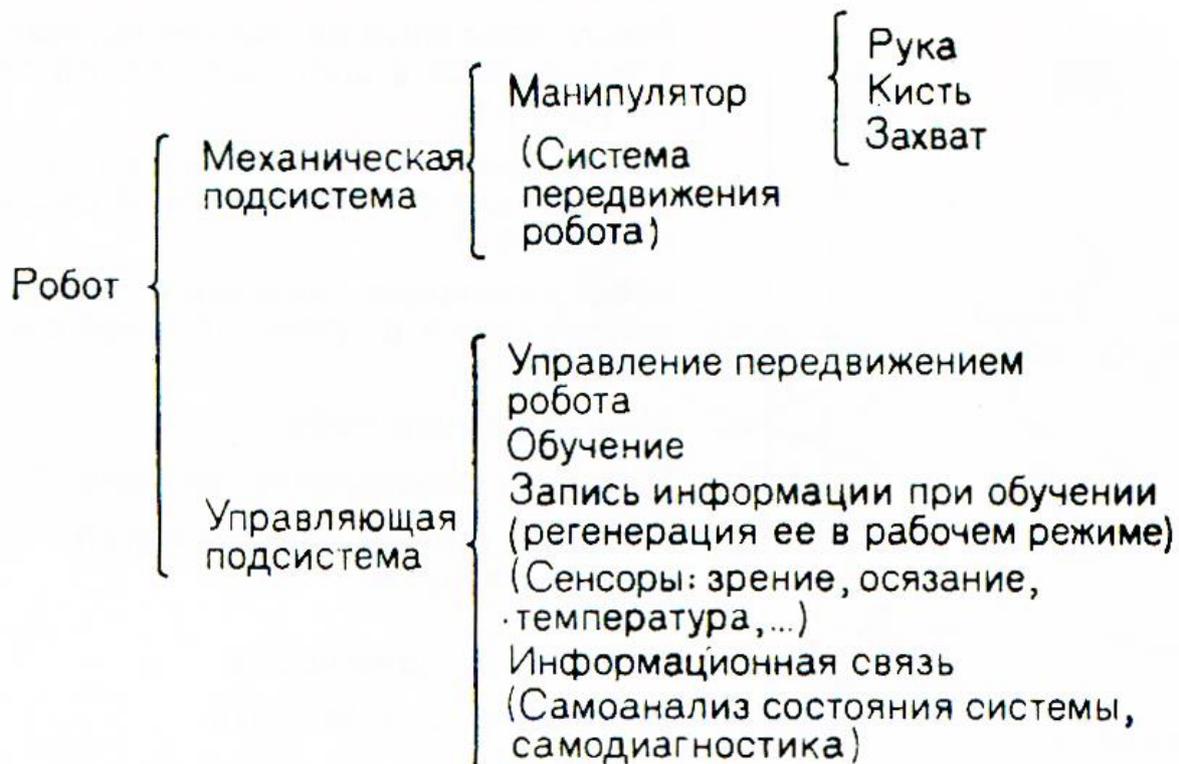


Рис. 1.5. Основные компоненты промышленной робототехнической системы

В общем случае промышленный робот состоит из двух основных систем – исполнительской и управляющей.

Исполнительная система в свою очередь подразделяется на манипулятор, выполняющий заданную работу, и систему передвижения, доставляющую манипулятор к рабочему месту.

Система управления принимает от человека задание на работу и обеспечивает контроль за его выполнением.

Устройство рассмотренных систем для разных моделей роботов может оказаться существенно различным. Например, система управления простейших роботов с жесткой последовательностью операций не использует вычислительной машины. В скобках на рис. 1.5 приводятся возможные варианты основных элементов робототехнических систем для различных типов роботов.

Из всего известного многообразия ПР можно выделить конструкции нескольких поколений.

**Роботы первого поколения** – это роботы с программным управлением, предназначенные в основном для выполнения определенной, заранее запрограммированной последовательности операций, диктуемой тем или иным технологическим процессом. В роботах первого поколения перепрограммирование производится человеком, после чего промышленный робот действует автоматически, многократно повторяя жестко заданную программу, формируемую в режиме обучения с помощью оператора. Функциональные возможности роботов первого поколения ограничены малым ассортиментом датчиков и несовершенством системы программного управления.

Структура роботов 1-го поколения приведена на рис. 1.6.

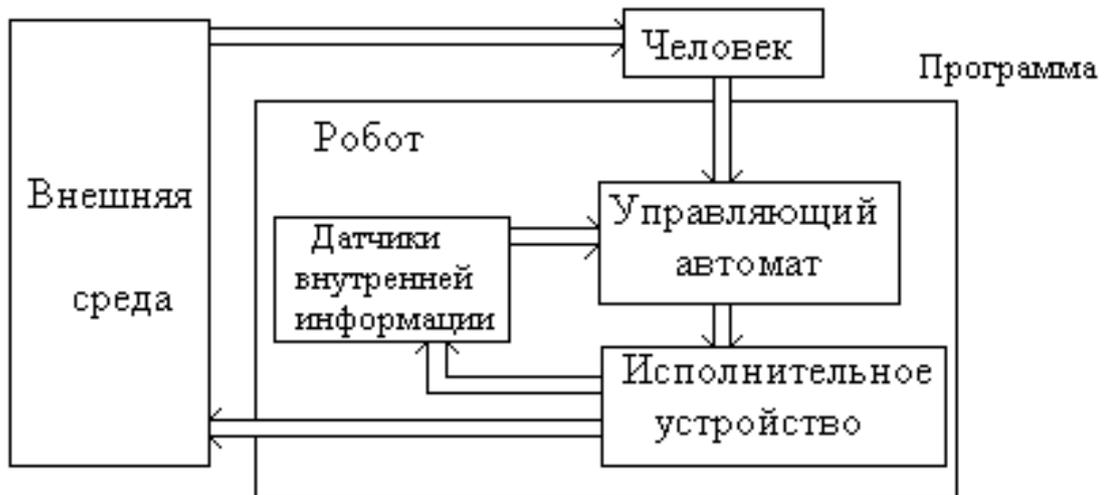


Рис.1.6. Структура роботов первого поколения

Из сенсорных элементов в этой структуре используются лишь датчики внутренней информации, позволяющие автоматически определять текущее состояние исполнительных устройств. Управление осуществляется управляющим автоматом, который может быть реализован на основе микропроцессорных контроллеров.

**Роботы второго поколения** – это роботы с адаптивным управлением. Они отличаются от роботов первого поколения большим ассортиментом датчиков внешней информации и более сложной самонастраивающейся системой автоматического управления, построенной на базе микропроцессорной техники и управляющей ЭВМ. Во втором поколении программы действия робота задаются человеком, но сам робот имеет свойство в определенных рамках перепрограммироваться (адаптироваться) в ходе технологического процесса в зависимости от обстановки, которая неточно определена заранее.

Структура робота 2-го поколения показана на рис. 1.7. В этой структуре наряду с датчиками внутренней информации используются датчики внешней информации, позволяющие роботу адекватно реагировать на изменения внешней среды при выполнении заранее заданной программы. Причем в зависимости от состояния датчиков, робот может автоматически выбирать альтернативные ветви основной программы.

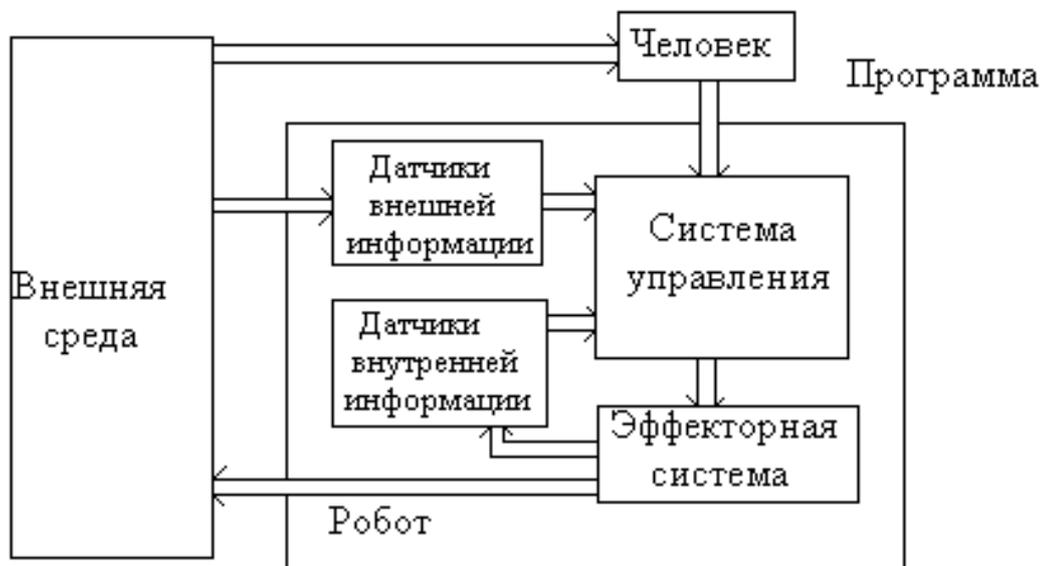


Рис. 1.7. Структура робота второго поколения

**Третье поколение** – это роботы с интеллектуальным управлением от ЭВМ. Они принципиально отличаются от роботов второго поколения сложностью функций и совершенством системы автоматического управления, включающей в себя те или иные элементы искусственного интеллекта. Такие роботы предназначены не столько для имитации физических действий человека, сколько для автоматизации его интеллектуальной деятельности. В третьем поколении задание на работу вводится человеком в более общей форме, а сам промышленный робот имеет возможность принимать решение и планировать свои действия в распознаваемых им неопределенной или меняющейся обстановке, чтобы суметь выполнить заложенное в его память задание. Роботы третьего поколения имеют наиболее развитую структуру, содержащую систему ИИ (рис. 1.8).

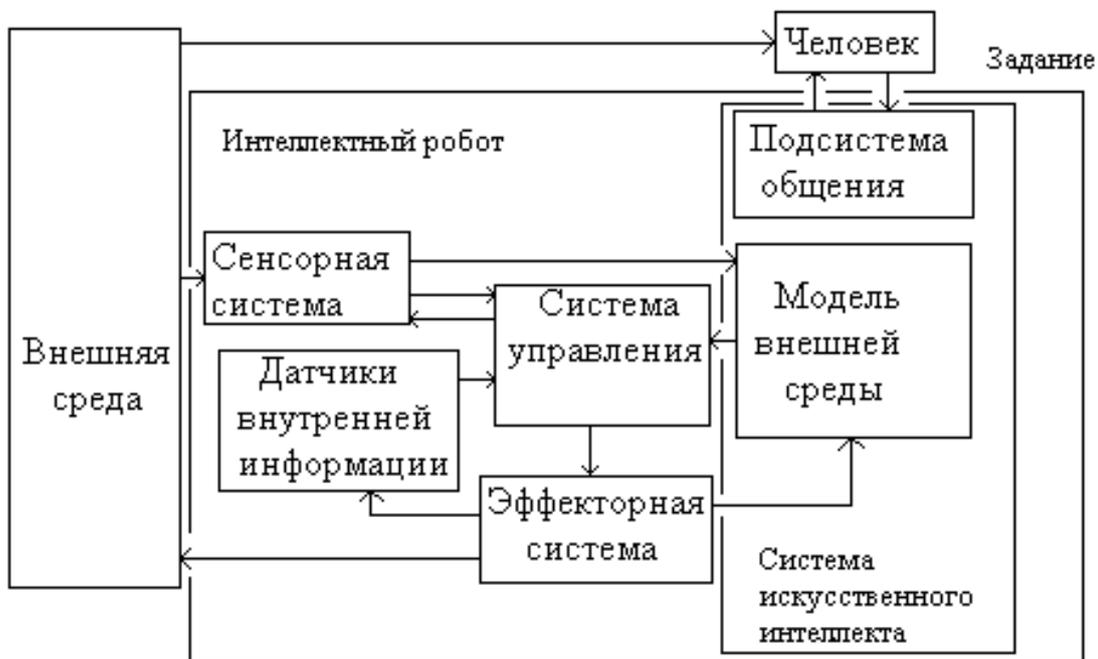


Рис. 1.8. Структура робота третьего поколения

Принципиальное отличие интеллектуального робота в том, что он способен автоматически строить модель внешней среды и использовать эту модель для формирования программы своего поведения.

Такой робот получает указания общего характера, например: пойти туда-то, взять то-то, перенести туда-то и т. п. на естественном языке. Расшифровав его в подсистеме общения, интеллектуальный робот самостоятельно планирует траекторию перемещения с учетом имеющихся знаний о внешней среде и тех сведений, которые он оперативно получает через сенсорную систему в процессе выполнения задания. Если при этом встречаются непреодолимые препятствия или другие затруднительные ситуации, система ИИ непосредственно или через систему связи связывается с человеком-оператором, задает ему конкретные вопросы и, получив помощь, снова действует автономно.

Для реализации разумного поведения в состав робота наряду с сенсорной, управляющей и эффекторной системами должна входить система, имитирующая интеллект человека. Искусственный интеллект необходим для управления роботом при его автономном функционировании в априори неисследованной внешней среде. Необходим он также и для общения на естественном языке с человеком-оператором, который в общем случае находится на значительном удалении от робота. Управление роботом осуществляется по иерархическому принципу, в соответствии с которым система управления (СУ) реализует тактический уровень, а система искусственного интеллекта (СИИ) воспроизводит стратегический уровень управления. Причем, используя биологическую терминологию, можно считать, что СУ служит аналогом спинного мозга, а СИИ – техническим аналогом высших отделов головного мозга.

Система управления робота может быть выполнена в виде специализированного автомата с памятью либо реализована программным способом на основе универсальной ЭВМ. То же самое можно сказать и о системе, искусственного интеллекта. Система связи включает проводной или беспроводной канал передачи информации и на приемном конце также предполагает использование ЭВМ. На экране дисплея этой ЭВМ отображаются ситуации, попадающие в поле зрения робота либо непосредственно, либо в виде модели, которую робот синтезирует автоматически.

Отличительной чертой интеллектуальных роботов является их способность к обучению на опыте и адаптации в процессе решения задач. В общем случае интеллектуальный робот способен вести диалог с человеком, формировать в себе модель производственной обстановки. Распознавать и анализировать ситуации, обучаться понятиям и навыкам, планировать поведение, строить программные движения двигательной системы и осуществлять их надежную отработку в условиях препятствий и неполной информированности об изменяющихся производственных условиях.

Наиболее сложной и мало разработанной системой в структуре робота является система искусственного интеллекта (ИИ). Сложность создания системы ИИ связана с тем, что до конца не ясно, как устроен и как функционирует интеллект естественный.

Попытки обойти эту проблему привели к разработке роботов, у которых система ИИ отсутствует полностью. Это были роботы первого поколения, предназначенные для работы в исследованной и специально организованной внешней среде. Они лишены не только интеллекта, но и сенсорики. Образно говоря, такие роботы имитируют поведение глухих, слепых и неразумных животных.

Роботы трех поколений образуют иерархию, основанием которой служат простейшие роботы-автоматы, а вершиной – сложные, эволюционирующие интеллектуальные роботы. Подобно живым организмам роботы не только развиваются по пути от простого к сложному, не только прошли в своем развитии несколько поколений, но и образовали симбиоз этих поколений, поскольку создание высших поколений роботов не отрицает необходимость в совершенствовании и использовании роботов низших поколений.

В связи с быстрым развитием нейрокомпьютеров и нейросетевых технологий **появилась возможность создания роботов четвертого поколения** – роботов с нейронными системами управления. Принципы нейронного управления в значительной степени аналогичны принципам работы мозга и нервной системы человека. Такие системы не программируются заранее. Они обучаются и самоорганизуются на решение различных двигательных, информационных и интеллектуальных задач.

**Важно отметить, что поколения ПР не сменяют друг друга, а дополняют и работают там, где это наиболее целесообразно.**

ПР 1-го поколения способны заменить порядка 2% рабочих;

2-го поколения – 25...30%;

3-го поколения – до 60%.

Автоматизированные на базе ПР технологические комплексы были названы **роботизированными технологическими комплексами** (РТК). ПР составляют 90% всего парка роботов в мире.

По мере развития робототехники появились **гибкие производственные системы** (ГПС), обеспечивающие полную автоматизацию технологического цикла.

В последние годы в робототехнике происходят качественные изменения, основанные на использовании достижений новой науки – **мехатронике**. Это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

Разделение роботов на поколения является общепринятой и важной структурной особенностью робототехники. Однако такое разделение не исчерпывает всех классификационных признаков современных роботов.

### 1.3. Классификация роботов

Одним из основных классификационных признаков, определяющих структуру, состав, внешний вид, эксплуатационные характеристики современных роботов, является их **назначение**. Классификация по этому признаку приведена на рис. 1.9. Класс ПР предназначен для автоматизации процессов и операций в машиностроении.



Рис. 1.9. Классификация современных роботов

Все существующие модели промышленных роботов можно также подразделить на несколько больших групп по признакам: область применения и вид производства; устройство и функциональные возможности манипулятора, способ организации управления, и др. Например, сварочные и окрасочные роботы названы так в соответствии с технологическими операциями, для которых они предназначены.

Как показано на рис. 1.10, промышленные роботы можно классифицировать по количеству степеней подвижности манипулятора, форме и размерам рабочей области, а также по предельно допустимому весу переносимых деталей. По тому, какую информацию достаточно получить роботу, чтобы выполнить заданную работу, и по тому, каким образом робот обучается новым операциям, можно легко судить об уровне возможностей робототехнической системы.

**По характеру выполнения операций** ПР разделены на три группы:

- производственные (технологические) роботы;
- подъемно-транспортные (вспомогательные) роботы;
- универсальные роботы.

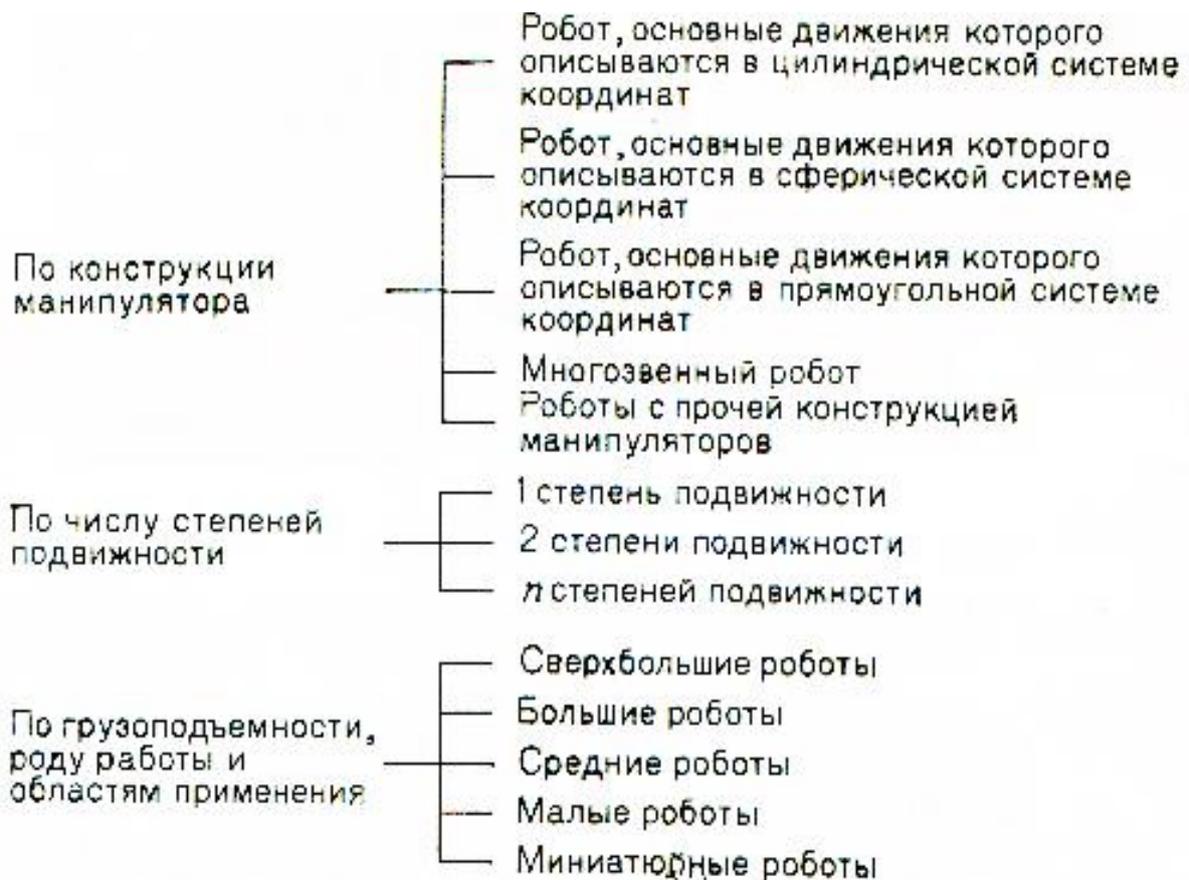


Рис. 1.10. Классификация ПР по механическим признакам

***По степени специализации:***

- специальные – выполняют определенную технологическую операцию или обслуживают конкретную модель основного технологического оборудования;
- специализированные (целевые) – выполняют технологические операции одного вида (сборка, сварка и т.д.) или обслуживают широкую номенклатуру моделей основного технологического оборудования, объединенных общностью манипуляционных действий;
- многоцелевые – выполняют различные основные и вспомогательные операции.

***По области применения и виду производства:*** литейные, штамповочные, сварочные, механической обработки, термообработки, нанесения покрытий, сборочные, автоматического контроля, лазерной обработки, транспортно-складские и прочие.

***По виду систем координат,*** в которых они работают: прямоугольная (плоская и пространственная); полярная (плоская, цилиндрическая и сферическая); ангулярная или угловая (плоская, цилиндрическая и сферическая).

***По числу степеней подвижности:*** с одной, двумя, тремя, четырьмя степенями подвижности и со степенями подвижности более четырех.

***По грузоподъемности:*** сверхлегкие – грузоподъемность до 1 кг; легкие – свыше 1 до 10 кг; средние – свыше 10 до 200 кг; тяжелые – свыше 200 до 1000 кг; сверхтяжелые – свыше 1000 кг.

***По мобильности (подвижности):*** стационарные и подвижные.

***По способу установки на рабочем месте:*** встроенные в оборудование, напольные, подвесные.

***По типу силового привода:*** электромеханические, пневматические, гидравлические, комбинированные.

***По месту расположения приводов:*** в едином блоке, на подвижных звеньях, комбинированная компоновка.

***По количеству манипуляторов:*** с одним, двумя, тремя и четырьмя манипуляторами.

***По исполнению:*** нормального исполнения, пылезащитные, теплозащитные, влагозащитные, взрывобезопасные и т.д.

***По быстродействию:*** малое – линейные скорости по отдельным степеням подвижности до 0,5 м/с; среднее – линейные скорости свыше 0,5 до 1 м/с; высокое – линейные скорости свыше 1 м/с;

***По точности позиционирования:*** малая – погрешность позиционирования до 1 мм и выше; средняя – погрешность позиционирования от 0,1 до 1 мм; высокая – погрешность позиционирования менее 0,1 мм.

***По характеру обработки программы:***

- жесткопрограммируемые – программа действий содержит полный набор информации не изменяющейся в процессе работы;

- адаптивные – осуществляют свои действия с использованием информации об объектах и явлениях внешней среды, полученной в процессе работы (имеют сенсорное обеспечение, позволяющее корректировать управляющую программу);

- гибкопрограммируемые – способны формировать программу своих действий на основе поставленной цели и информации об объектах и явлениях внешней среды.

**По характеру программирования:** позиционные – движение осуществляется от точки к точке; контурные – движение осуществляется по непрерывной траектории; комбинированные.

**По дискретности перемещения:** много- и малоточечные.

Рекомендуемые элементы классификации и кодирования ПР приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Позиция в коде	Классификационный признак	Рекомендуемые обозначения
1	Целевое назначение и функциональные возможности	Г, Л, К, С, У
2	Вид оборудования	М
3	Грузоподъемность, кг	1;2,5; 5; 10; 20; 40; 80; 160; 250; 500
4	Тип системы	Ц, Ф2, Ф3, Ф4
5	Компоновочная схема	00-99
6	Конструктивное исполнение (модификация)	00-99

На первом месте в модели ПР указывается значение классификационного признака по целевому назначению и функциональным возможностям. По этому признаку приняты следующие обозначения: Г – для обслуживания в гальваническом производстве; К – для обслуживания кузнечно-прессового оборудования; Л – для обслуживания литейных машин; С – для обслуживания металлорежущих станков; У – универсальные.

Второе место в общем коде модели отводится обозначению типа оборудования. В данном случае буква М означает «Манипулятор автоматический с программным управлением».

Третье место в коде характеризует грузоподъемность робота.

На четвертом месте кода приводится тип системы управления ПР. Рекомендованы следующие обозначения: Ц – цикловое ПУ; Ф2 – позиционное ЧПУ; Ф3 – контурное ЧПУ; Ф4 – универсальное ЧПУ..

На пятом месте приводится компоновочная схема. Принято классифицировать компоновки механической системы ПР в зависимости от применяемой системы координат основных перемещений.

Шестое место характеризует конструктивное исполнение (модификацию) робота.

В соответствии с классификацией обозначение робота модели СМ80Ц.48.11 можно расшифровать следующим образом: СМ – автоматический манипулятор для обслуживания металлорежущих станков; 80 – грузоподъемность, кг; Ц – цикловое программное управление; 48 – индекс схемы компоновки( в данном случае он указывает, что робот работает в полярной системе координат); 11 – конструктивное исполнение.

#### **1.4. Перспектива робототехники**

В настоящее время инженеры занимаются оснащением промышленных роботов различными датчиками, которые позволяют им "видеть", "осознать" и "слышать". Машины, обладающие такими невиданными ранее возможностями, могут получать информацию о событиях, происходящих в окружающем их мире, т. е. они будут иметь то, что на языке инженеров называется "обратной связью" – машины обретут способность реагировать на изменения в окружающей обстановке, их функции не будут ограничены выполнением определенной последовательности команд. Прогресс наблюдается и в том, что компьютеры, предназначенные для управления роботами, постоянно совершенствуются – становятся более быстродействующими и "хитроумными", т. е. приобретают человеческие способности к логическому "мышлению". Это придает роботам большую универсальность и гибкость. Они смогут вырабатывать собственный образ действий.

Наибольшие изменения ожидаются в сфере применения роботов. До сих пор лишь считанное число робототехнических установок использовалось за пределами заводских цехов и лабораторий. Современные инженеры занимаются не только совершенствованием промышленных роботов, но и модифицируют их, стремясь приспособить для работы в гораздо более разнообразных условиях. Роботы находят применение в тех областях, где уже прижились другие технические изделия: в быту, в военном деле и там, где человеку работать опасно: в атомных реакторах и даже в негостеприимных просторах космоса.

Процесс освоения роботами новых, все более разнообразных профессий, вероятно, не может протекать гладко. Он может привести к значительным социальным переменам, причем как в лучшую, так и в худшую сторону. Внедрение роботов – это неотъемлемая составляющая технического прогресса, цель которого заключается в создании машин, способных заменить людей при выполнении различных работ.

Люди часто расходились во мнениях относительно благоприятности для человечества внедрение таких технических новинок. Некоторые считали, что эти машины позволяют создавать новые виды изделий, расширяют возможности проведения деловых операций, а также освободят людей от вы-

полнения утомительных работ. По мнению других, подобные устройства могут оказать не столь уж добрую услугу. Так, вытесняя ручной труд, они могут повысить угрозу безработицы. Появление новых поколений роботов, несомненно, породит аналогичные вопросы относительно их влияния на развитие общества.

## 1.5. Аналоги промышленных роботов

ПР имеют аналоги, которые появились раньше их, но успешно работают и в наше время. Промышленная робототехника многое заимствовала из накопленного опыта проектирования, производства и эксплуатации этих устройств.

Следует учитывать этот опыт, чтобы правильно выбирать конкретные технические средства (роботы или другое оборудование), а также, если нужно, заимствовать проверенные технические решения из смежных областей. Сходство ПР с другими машинами и устройствами можно установить по двум критериям:

- функциональная общность;
- конструктивная общность;
- комплексный подход.

К вспомогательным ПР функционально близки *автооператоры, копирующие манипуляторы с ручным управлением, самобалансирующиеся манипуляторы, краны с жестким закреплением груза*. Некоторые из них и внешне похожи на ПР.

К технологическим ПР функционально близки *автоматы одинакового назначения* (например, к сварочным ПР – сварочные автоматы).

Технологические автоматы иногда конструктивно совершенно не похожи на типовые роботы, но схожими могут быть устройства их управления.

### 1.5.1. Автооператоры

Робот, снабженный манипулятором, называют *манипуляционный роботом*. Э этой позиции, *автооператор (А)* – это не перепрограммированный автоматический манипуляционный робот. Основные особенности автооператора: выполнение примитивных операций по одной и той же жесткой программе. Автооператоры обычно предназначаются для загрузки заранее ориентированных заготовок в зажимные устройства станков, переноса обработанных заготовок из зоны обработки и т.п.

Узкая специализация автооператоров позволяет выполнять их простыми, дешевыми и надежными. Известны два базовых типа автооператоров: порталный и встроенный. У порталного автооператора одна или две руки установлены на тележке, перемещающейся по траверсе. Установка и взятие заготовок осуществляется сверху. Автооператор обслуживает

один или несколько станков. Его возможности в этом отношении определяются длиной траверсы. Такие автооператоры (рис. 1.11) получили распространение еще в середине 20-го века. В наше время их стали снабжать перепрограммируемыми устройствами управления. Поэтому они перешли в разряд порталных промышленных роботов.

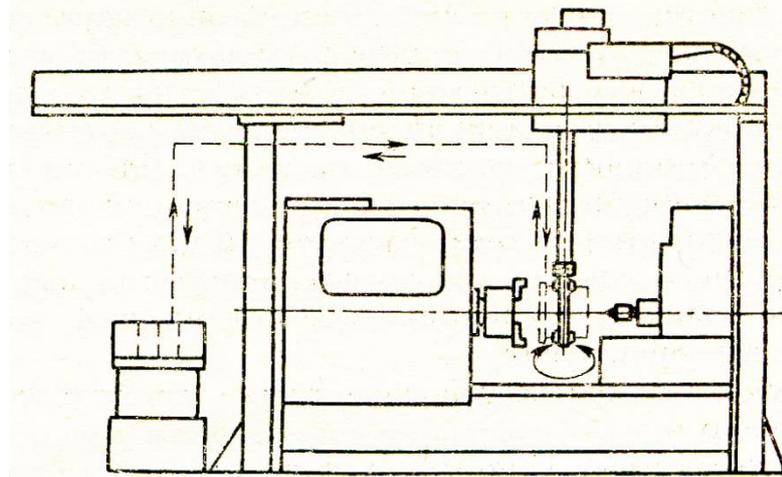


Рис. 1.11. Автооператор

Одновременно с порталными, появились встроенные автооператоры. Их устанавливают на станинах или суппортах станков. Они работают вблизи рабочей зоны и до настоящего времени сохранили свою актуальность и распространение. Их механизмы могут иметь малые габариты с небольшими перемещениями. Узкая специализация позволяет подавать заготовки в очень удобное положение, а манипуляторы автооператоров могут иметь малое число степеней подвижности. Известны манипуляторы, у которых рабочий орган (питатель) имеет одну, обычно поступательную, степень подвижности.

Более распространенными являются автооператоры с двумя степенями подвижности. Три степени подвижности встречаются реже. Обычно автооператоры не приспособлены для изменения ориентации объектов или изменяют ориентацию при установке на один и тот же угол ( $90^\circ$  или  $180^\circ$ ). Если на последовательных этапах обработки требуется переустанавливать заготовку в различных положениях, то нередко устанавливается отдельный механизм с одной степенью подвижности – кантователь, обслуживаемый тем же автооператором.

Самостоятельные механизмы, работающие совместно с автооператорами, устанавливаются тогда, когда необходимо обеспечить большие перемещения или траектории переноса являются сложными. Если транспортер, по которому поступают детали или заготовки, располагается значительно ниже зоны, в которую их нужно подавать, то устанавливается специальный подъемник, перемещающий эти детали или заготовки в рабочую зону автооператора. Иногда также предусматриваются специальные устройства для транспортирования в горизонтальной плоскости.

Рабочие органы автооператоров выполняются с одним, с двумя или даже с четырьмя схватами, причем в одних случаях схваты крепятся на одной раме, а в других – перемещаются самостоятельно.

Приводы большинства автооператоров гидравлические. Это целесо-

образно, если обслуживаемое оборудование также имеет гидравлические устройства. Двигателями в этом случае являются гидроцилиндры, задающие перемещения прямо на звенья или через простейшие шарнирные механизмы. Меньшее распространение в конструкции автооператора получил пневмопривод. Если допускает компоновка, то к простым и надежным конструктивным решениям приводит использование механического привода обслуживаемого оборудования (через распределительный вал).

Программирование движений обычно осуществляется так, что перемещения по степеням подвижности осуществляются последовательно, друг за другом. Линейные перемещения звеньев автооператоров, установленных на оборудовании, обычно невелики (порядка 0,2...0,4 м), скорости перемещений обычно не превышают 0,1...0,2 м/с, а время цикла – 10...20 с. Конструкции манипуляторов для автооператоров выполняются жесткими, поэтому они могут быть сделаны достаточно точными.

Сходство и различие автооператоров со вспомогательными промышленными роботами в следующем.

- Применительно к подвесным и встроенным автооператорам и роботам можно констатировать сходство схем, компоновок и конструктивных решений, но роботы, как правило, имеют большее число степеней подвижности (три и более).

- Среди автооператоров не встречается конструкции, аналогичной напольному роботу, который в робототехнике является самым распространенным.

- Типично различие в приводах: приводы роботов чаще пневматические или электромеханические, а не гидравлические, что характерно для автооператоров.

- Для роботов характерны большие ходы, большие скорости перемещений и меньшие времена цикла. В устройствах управления роботов предусматривается возможность перепрограммирования, чего нет у автооператоров.

Когда создавали первые роботы для обслуживания металлорежущих станков, автооператоры служили прототипами как в целом, так и по отдельным узлам.

### **1.5.2. Манипуляционные роботы с ручным управлением**

Таким манипулятором управляет человек-оператор. Манипулятор имеет приводы, обычно гидравлические и электрические. Манипуляторы с ручным управлением используются, тогда, когда необходимо поднимать большие грузы, а также, когда оператор не может находиться в одной среде с манипулируемым объектом, например в воде на большой глубине, в агрессивной среде, в космосе.

В первом случае оператор может находиться рядом с захватным устрой-

ством, во втором – управление является дистанционным. Различают следующие виды управления манипуляторов: *командное, копирующее, полуавтоматическое, супервизорное.*

- При командном управлении оператор кнопками включает приводы, на глаз контролируя выполнение движений.

- При копирующем управлении оператор перемещает специальную рукоятку, а манипулятор в определенном масштабе (обычно с увеличением) повторяет ее движения.

- При полуавтоматическом управлении оператор прикладывает к рукоятке усилия, приводы работают так, что скорость перемещения рабочего органа пропорциональна усилию.

- Супервизорное управление гораздо сложнее: в основном движение происходит автоматически, оператор лишь управляет введением в действие отдельных программ или команд, указывает цели движения.

Отметим характерные особенности манипуляторов с ручным управлением в зависимости от назначения. Манипуляторы большой грузоподъемности, например погрузчики (рис. 1.12), обычно имеют немного степеней подвижности, привод гидравлический, захватное устройство без подвижных элементов (типа крюка, вил или лопаты), скорости перемещений малые (порядка 0,1 м/с).

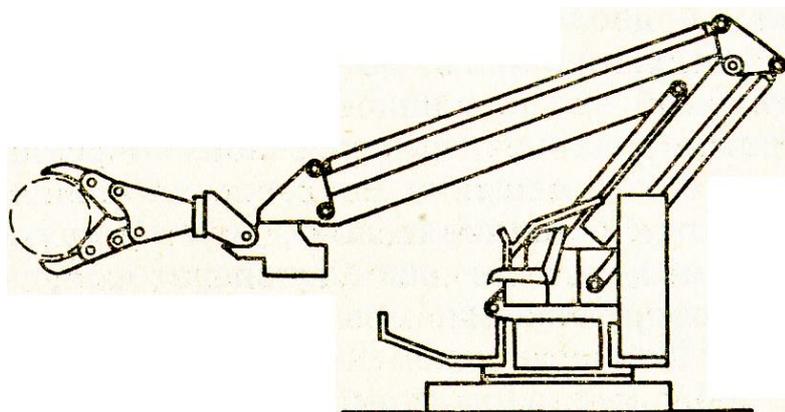


Рис. 1.12. Манипулятор с ручным управлением (погрузчик)

Конструкции их обычно массивные, внешнее подобие руке человека не всегда имеет место. Подобные манипуляторы работают во многих отраслях: в металлургии, на транспорте, в машиностроении на разгрузке и сортировке и пр.

Манипуляторы с дистанционным управлением для работы в воде, космосе или вредных средах обычно имеют системы копирующего или полуавтоматического управления, число степеней подвижности велико (шесть или семь). Часто такие манипуляторы выполняются двурукими.

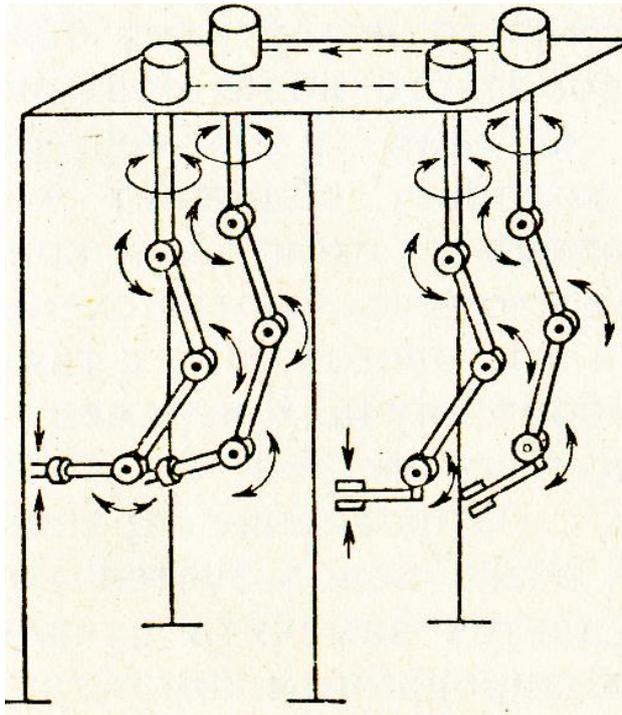


Рис. 1.13. Манипулятор со свисающими руками

Одна из наиболее удобных компоновок – когда руки свисают сверху (рис. 1.13). При этом наиболее удобно наблюдение за движениями манипулятора. Рабочие органы выполняются обычно в виде клещей, но иногда делаются сменными. Привод чаще всего электромеханический, диапазон изменения скоростей обычно достаточно широкий, движения переноса выполняются быстро, наиболее точные – медленно.

Манипуляторы такого типа представляют собой достаточно громоздкие, сложные и дорогостоящие установки, выпускаемые малыми сериями.

Они давно используются в атомной, химической и биологической промышленности, но не в основном производстве, а в исследованиях, поскольку манипуляторы работают достаточно медленно, и работа с ними для оператора утомительна.

### 1.5.3. Сбалансированные манипуляторы

Сбалансированным называется манипулятор с ручным управлением, имеющий систему автоматического уравнивания рабочего органа вместе с грузом. Они называются также манипуляторами с автоматическим уравниванием груза.

Принцип действия таких манипуляторов заключается в том, что автоматически осуществляется только компенсирование силы веса (обычно с помощью пневмоцилиндров, в полости которых подается специально отрегулированное давление), а перемещения уравновешенного объекта задает рабочий. Грузоподъемность таких манипуляторов (рис. 1.14) обычно составляет 100...500 кг.

Перемещения обычно осуществляются медленно, поскольку рабочему приходится преодолевать инерционность тяжелого объекта.

Сбалансированные манипуляторы заменяют краны, погрузчики, тали и другие подъемные устройства при обслуживании складов, монтаже и демонтаже, разгрузке и загрузке транспорта, упаковке готовых изделий, установке тяжелых заготовок на станки и снятии их.

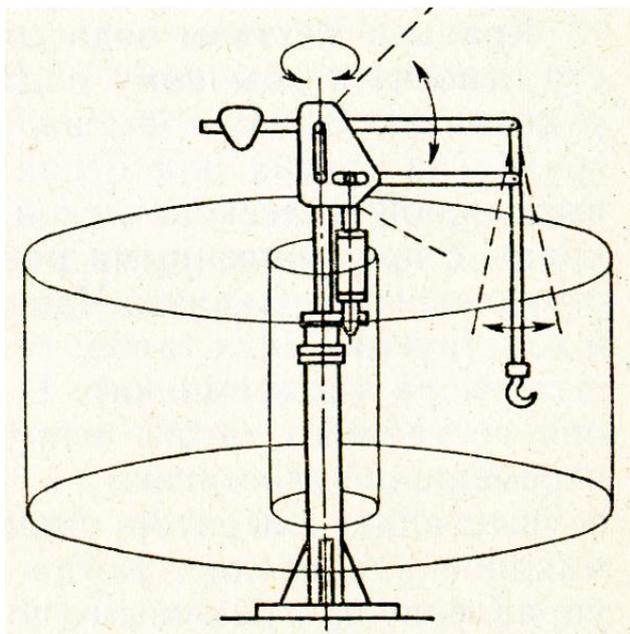


Рис. 1.14. Сбалансированный манипулятор

Применение сбалансированных манипуляторов не высвобождает работников, но значительно облегчает труд и снижает потери времени. Сбалансированные манипуляторы бывают подвесными, но чаще они выполняются напольными, иногда на тележках, чтобы их можно было проще перемещать и устанавливать на любом месте.

Размеры сбалансированного манипулятора согласованы с ростом человека (высота примерно в 1,5 раза превышает рост), допустимые перемещения по вертикали составляют около 1,5 м, в горизонтальной плоскости – около 2 м.

Потребность в простых и дешевых сбалансированных манипуляторах велика. Они не относятся к промышленным роботам, поскольку работают не автоматически, не по программе. Длительное время было неясно, куда их относить.

Теперь наметилась тенденция объединять сбалансированные и некоторые другие манипуляторы с промышленными роботами, поскольку они схожи по схемам и конструктивным решениям, используются для технического решения сходных задач и иногда выпускаются одними и теми же организациями.

#### 1.5.4. Краны с жестким подвесом груза

Такие краны часто относят к обычному подъемно-транспортному оборудованию. Однако замена свободного подвешивания груза (на тросах или цепях) жестким (например, на выдвижной телескопической колонне) сближает эти краны с промышленными роботами по схемным и конструктивным решениям.

Чаще всего встречаются схемы и конструкции двух типов: типа мостового крана и типа штабелера (подъемника). В обоих случаях перемещения составляют метры или десятки метров, скорости перемещений достигают 1 м/с. Управление краном осуществляет оператор, чаще всего используется командное управление. Когда удастся заменить ручное управление программным (по кодированным командам, поступающим по каналам связи), то кран переходит в разряд промышленных роботов. При

этом он может работать с грузами, установленными на вполне определенных местах и точно ориентированными.

### 1.5.5. Специальные манипуляторы

Эти манипуляторы, управляемые вручную, приспособлены для выполнения вполне определенных операций. Наиболее разнообразны ковочные манипуляторы с ручным управлением, предназначенные для манипулирования заготовками во времяковки (после каждого удара может производиться ее поворот и смещение). В случае необходимости эти же манипуляторы транспортируют заготовки от нагревательных печей к прессам или молотам и затем к другим агрегатам. Ковочные манипуляторы имеют большую грузоподъемность (до нескольких тонн). Некоторые из них делаются на колесном шасси (типа автомобильного). По конструкции ковочные манипуляторы сильно отличаются от всех распространенных типов промышленных роботов. В частности, для них характерно громоздкое и тяжелое захватное устройство.

Для технологических промышленных роботов сходство с соответствующим автоматическим технологическим оборудованием того же назначения обычно меньше, чем для вспомогательных. Так, автоматы для шовной электросварки листов компонуются иначе, чем типовые сварочные роботы; станки и роботы для шлифования также значительно различаются по конструкции и общему виду.

Опыт, накопленный при создании автоматического технологического оборудования, непосредственно переносится на роботы преимущественно в части рабочих (технологических) органов: сварочных клещей, горелок, распылителей и пр., а также в части построения систем управления.

### 1.6. Номенклатура основных показателей новой техники

Данные о любом выпускаемом промышленностью промышленном роботе приводятся в паспорте и техническом описании. В паспорте содержатся те данные, которые нужны в первую очередь тем потребителям, кто будет подбирать робот по своим потребностям и возможностям. Чтобы всегда данные представлялись в одном и том же наборе и давали максимально полное представление о роботе, номенклатура основных показателей стандартизована.

В государственном стандарте (ГОСТ 25378-82) показатели делятся на две группы: качественные (общие сведения) и количественные (технические характеристики).

В число общих сведений входят:

- **Выполняемая функция** (например, обслуживание токарных станков, точечная сварка).

Когда указывается выполняемая функция, то в первую очередь отмечается, вспомогательный робот или технологический. Если робот вспомогательный специальный или специализированный, указываются конкретные модели оборудования (марки станков), с которыми робот может работать, и это гарантируется.

При этом возможно, что робот может работать и с другим оборудованием, без всяких переделок или с некоторыми доделками. Иногда указывается просто, что робот является универсальным, и никакое оборудование не перечисляется. Это обычно означает, что проектировщики полагают, что вопросы применимости данного промышленного робота следует решать по месту использования.

Бывает так, что для применения робота на определенном рабочем месте необходима более или менее существенная переделка. Чтобы избавить потребителей от необходимости переделок, проектируют и выпускают модульные промышленные роботы, модификации которых собираются из модулей в различных сочетаниях. Обычно модульные промышленные роботы (точнее, модульные комплекты) характеризуются наиболее широкой универсальностью.

- **Число степеней подвижности** (с указанием, сколько из них переносных и сколько ориентирующих).

- **Кинематическая схема** с обозначением вида степеней подвижности (поступательных и вращательных).

Кинематическая схема определяет основные возможности манипулятора в смысле достижимости точек пространства и простоты выполнения различных движений.

Часто в паспорте или описании приводится не кинематическая схема, а название системы координат, в которой работает манипулятор (например, прямоугольная, цилиндрическая или сферическая). Такого указания недостаточно, чтобы изобразить кинематическую схему, но определенные представления о манипуляторе это дает.

- **Вид привода** (пневматический, гидравлический, электромеханический, комбинированный).

- **Способ управления.**

- **Способ программирования.**

- **Вид рабочего органа**(схват, сварочные клещи, горелка и т.п.).

Часто наибольшее разнообразие требований предъявляется к рабочему органу (в первую очередь, к захватному устройству). Поэтому многие вновь проектируемые роботы снабжают сменными рабочими органами (в частности, схватами).

- **Способ его замены** (вручную или автоматически).

Степень разнообразия в наборе рабочих органов и простота их смены очень важны при практическом использовании.

- **Исполнение** (обычное, пылевлагозащищенное и т.п.).

Вид исполнения робота важен при нанесении краски и других покрытий (распыленная краска оседает на конструкции и может быть заедание в подвижных соединениях) и при работе с печами (возможен перегрев конструкции и элементов приводов).

В соответствии с ГОСТом 25378-82 в документацию всех видов на промышленные роботы включаются следующие технические характеристики.

**Номинальная грузоподъемность.** Для вспомогательных промышленных роботов она определяется как "наибольшее значение массы предметов производства или технологической оснастки, включая массу захватного устройства, при которой гарантируется их удержание и обеспечение установленных значений эксплуатационных характеристик" (ГОСТ 25686-85). Однако до сих пор в паспортах роботов и справочных материалах часто грузоподъемность относят только к объекту, без схвата. В приведенном определении грузоподъемности не уточняется, какие именно эксплуатационные характеристики должны сохранять установленные значения. Важны скорости перемещений (при больших массах усилий, создаваемых двигателями, недостаточно для выдерживания требуемых средних скоростей), показатели долговечности (при увеличении нагрузок увеличивается износ).

В настоящее время часто грузоподъемность не определяется экспериментально, а назначается проектировщиками и изготовителями. Если манипулятор имеет несколько рук, то грузоподъемность указывается для каждой из них.

**Максимальная абсолютная погрешность позиционирования.**

Погрешность позиционирования рабочего органа манипулятора определяется как линейное отклонение определенной точки (условного центра) рабочего органа от положения, задаваемого программой или специальными устройствами (например, упорами, концевыми выключателями). Погрешность позиционирования представляет собой вектор, который характеризуется величиной и направлением.

Когда говорится просто о погрешности позиционирования, то учитывается только величина (модуль) вектора, но не учитывается его направление. Погрешности могут быть различными в разных точках рабочей зоны. Когда говорится о максимальной погрешности позиционирования, то имеется в виду, что во всех точках погрешности не могут быть больше этой максимальной погрешности.

Экспериментальное определение погрешностей в отдельных точках требует точных средств измерений, определение максимальных погрешностей представляет собой довольно громоздкое исследование. Опыт показывает, что данные по точности, приводимые в паспортах, часто не подтверждаются, реальные погрешности могут быть раза в два выше. Заме-

тим, что нередко важны не только линейные, но и угловые погрешности (погрешности ориентирования). К сожалению, в настоящее время данные по ним в литературе не приводятся.

### ***Геометрические характеристики рабочей зоны.***

Рабочая зона представляет собой пространство, в котором может находиться рабочий орган при работе робота. Помимо рабочей зоны вводятся другие близкие геометрические понятия: зона обслуживания (пространство, в котором рабочий орган выполняет свои функции в соответствии с назначением робота), рабочее пространство (пространство, в котором могут находиться подвижные звенья манипулятора при работе робота). В рабочем пространстве могут находиться любые части робота (не только рабочий орган), рабочее пространство должно быть свободным от посторонних объектов.

Рабочая зона может несколько отличаться от зоны обслуживания. Рабочая зона и пространство представляются в виде объемных тел – параллелепипеда, цилиндра, шара, и пр. или частей этих тел. Простейшими геометрическими характеристиками рабочей зоны являются ее габариты. Если рабочая зона симметрична относительно оси  $x$  (рис. 1.15), то один из габаритных размеров (в плоскости, перпендикулярной оси) равен удвоенному вылету. Поэтому максимальный вылет, приводимый в паспортах и каталогах, можно считать характеристикой рабочей зоны.

### ***Показатели по степеням подвижности:***

- максимальное перемещение (линейное или угловое);
- время перемещения из одного крайнего положения в другое;
- максимальная скорость (линейная или угловая);
- максимальное ускорение (линейное или угловое);
- максимальная абсолютная погрешность;
- число программируемых точек (для систем циклового и позиционного управления).

Задание перечисленных показателей отдельно по степеням подвижности очень удобно при расчете и контроле показателей.

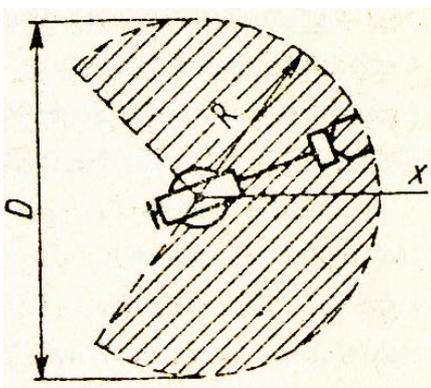


Рис. 1.15. Симметричная рабочая зона

Знание пределов перемещений необходимо при планировании расстановки оборудования и робота, время перемещения необходимо для расчета времени цикла и, в конечном счете, производительности. Максимальные скорости хорошо характеризуют технический уровень (в смысле быстродействия).

Максимальные ускорения

(они получаются при включении двигателя или при торможении подвижной части) используются для расчета запасов несущей способности захватных устройств и иногда запасов прочности наиболее напряженных элементов конструкций.

Погрешности позиционирования для отдельных степеней подвижности могут использоваться как исходные данные для расчета погрешностей манипулятора в целом.

**Показатели захватного устройства** (для вспомогательных промышленных роботов; если робот имеет набор сменных схватов, то указываются общие пределы для всех этих схватов): усилие захватывания; время захватывания; время отпускания; характерные предельные размеры захватываемого предмета, (например, минимальный и максимальный диаметры цилиндрического предмета).

**Показатели устройства управления:**

- число одновременно управляемых движений по степеням подвижности (в ряде случаев допускается только последовательное, друг за другом движение по степеням подвижности);
- число каналов связи с внешним оборудованием (по этим каналам подаются сигналы в устройство управления и на оборудование);
- параметры энергопитания (для роботов с пневмоприводом: давление и расход воздуха; для роботов с электроприводом: напряжение и потребляемая мощность).

**Показатели надежности:** установленная наработка на отказ; установленный срок службы до капитального ремонта и списания.

**Масса и габариты.**

Эти показатели обычно указываются отдельно для манипулятора и устройства управления. Габариты обычно приводятся для сложного состояния, приспособленного для транспортирования.

Если робот обладает какими-либо существенными особенностями, в паспорте или описании эти особенности указываются отдельно. Из большого числа показателей выделяются **основные**, по которым подбирается робот для работы на конкретном рабочем месте.

Главным параметром считается грузоподъемность.

Именно в порядке повышения грузоподъемности перечисляются промышленные роботы в каталогах. Для промышленных роботов установлены следующие группы по грузоподъемности:

- менее 1 кг – сверхлегкие;
- 1...10 кг – легкие;
- 10...200 кг – средние;
- 200...1000 кг –тяжелые;
- 1000 кг и больше – сверхтяжелые.

Во всех документах могут указываться не любые значения грузоподъемности, а только выбранные из параметрического ряда, записанного в ГОСТе 25204-82. Этот ряд (кг) следующий: 0,08; 0,16; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250 и т. д.

Геометрические характеристики, представляющие собой линейные и угловые величины (вылет, ходы и пр.), также важны для правильного выбора робота. В соответствии с ГОСТом 26062-84 установлены параметрические ряды для максимальных линейных и угловых перемещений.

Числа этого ряда (мм) следующие: 12; 20; 32; 50; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 1800; 2000.

Числа ряда для углов (в град) следующие: 15; 30; 45; 60; 90; 120; 180 и т. д.

Параметрический ряд установлен также для максимальной абсолютной погрешности позиционирования (числа в мм): 0,05; 0,1; 0,16; 0,25; 0,5; 1,0; 1,6; 2,5; 5,0; 10; 20.

Реальные значения перемещений могут отличаться от чисел, заданных параметрическим рядом, округление при этом производится в меньшую сторону (это будет означать, что действительное перемещение не меньше указанного).

Наоборот, реальные значения погрешностей округляются в большую сторону (действительные максимальные значения погрешностей не больше указываемых).

Параметрические ряды для других показателей не стандартизованы, однако в документах обычно приводятся округленные значения. Способ округления (сверху или снизу) определяется смыслом показателя. Значения скорости округляются в меньшую сторону, а ускорения – в большую. Последнее определяется необходимостью иметь гарантии того, что силы инерции не превосходят определенных значений.

Показатели быстродействия (времена перемещений, захватывания и отпускания) зависят преимущественно от вида привода (двигателей), а при одном и том же виде привода изменяются не в очень широких пределах. Так, для наиболее быстрого – пневматического привода эти времена могут быть значительно меньше.

Показатели устройств управления в паспорте промышленного робота обычно приводятся в краткой форме, а более полно даются в отдельном описании устройства управления.

Тип и возможности устройства управления очень важны при использовании промышленных роботов в гибких производственных системах, когда необходимо встраивать устройство управления в общую систему управления линией или участком.

Также отдельно устанавливаются показатели рабочих органов техно-

логических роботов, например расход краски для распылителей окрасочных роботов, максимальная сила тока электросварочного устройства и т. п.

Необходимо отметить, что выбор робота по номенклатуре основных показателей часто не дает правильного ответа на вопрос о возможности его применения в конкретных условиях.

Робот, подходящий по грузоподъемности, кинематической схеме, виду рабочего органа, возможностям устройства управления, вылету и перемещениям по степеням подвижности (остальные показатели обычно не являются решающими), может оказаться хорошим или плохим, удобным в эксплуатации или неудобным.

При этом могут быть решающими такие факторы, которые не находят прямого отражения в номенклатуре показателей, в частности, обоснованность конструктивных решений отдельных узлов, надежность крепления наиболее ответственных деталей, доступность основных узлов для осмотра, возможность быстрой смены блоков в случае их отказа и пр.

Поэтому специалисты, осуществляющие внедрение ПР, должны тем не менее помимо формальных паспортных данных о роботах знать основные особенности конструкций манипуляторов, особенности обслуживания и ремонта.

Иметь достаточно полные знания о выпускаемых промышленных роботах гораздо труднее, чем, скажем, об автомашинах, поскольку типаж роботов весьма разнообразен и их производят многие организации, различающиеся своими традициями и техническим уровнем. Выход заключается в том, чтобы уметь быстро проводить анализ совместно документации и самих реальных ПР.

### **1.7. Соотношения между основными параметрами роботов**

При сопоставлении промышленных роботов по основным показателям нужно представить, каковы их типичные значения, т. е. каков "средний" робот.

По отклонениям характеристик любого рассматриваемого робота от характеристик "среднего" (в ту или иную сторону) могут быть сделаны выводы относительно качества робота.

Положение осложняется тем, что схемы манипуляторов разнообразны, а для каждой схемы соотношения между основными параметрами оказываются своими, отличными от аналогичных соотношений для других схем. Поэтому надо сначала выделить характерные типы, а затем для них по отдельности определять типовых представителей или средние закономерности.

Первый, наиболее распространенный тип представляет *напольный вспомогательный промышленный робот* (рис. 1.16) *с одной горизонтальной выдвижной рукой и с вертикальной колонной*, вокруг оси которой осуществляется поворот руки.

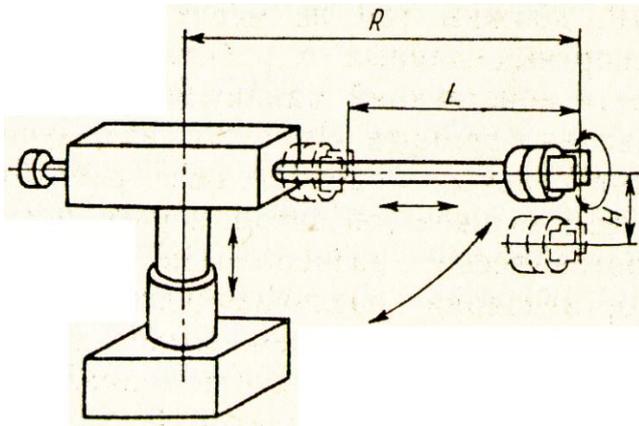


Рис. 1.16. Напольный вспомогательный ПР

Такие роботы – сверхлегкие и легкие – обычно имеют пневмопривод, степеней подвижности – четыре (три переносные<sup>2</sup> и одна ориентирующая), Такой робот работает в цилиндрической системе координат, устройство управления – цикловое. Грузоподъемность определяется номинальным значением массы  $m$  предмета.

Зависимыми считают параметры:

- радиус рабочей зоны

(вылет);

- горизонтальный ход (при выдвижении руки)  $L$ ;
- вертикальный ход  $H$ ;
- масса манипулятора в целом  $M$ .

Для известных конструкций отечественных ПР с ростом грузоподъемности растут все геометрические параметры. Эта закономерность проявляется в среднем, и имеются исключения, когда большим значением грузоподъемности соответствуют меньшие значения вылета и ходов.

Рост геометрических параметров сначала более быстрый, а затем медленный. Практически предельными следует считать значения: вылета 2...2,5 м, горизонтального хода 1...1,3 м, вертикального хода 0,5 м. В среднем получается, что горизонтальный ход в два раза меньше вылета, а вертикальный ход в 2...4 четыре раза меньше горизонтального. Такие соотношения типичны для манипуляторов с так называемым консольным механизмом подъема. Для роботов очень малой грузоподъемности (иногда их называют мини-роботами) ходы могут быть очень малыми – немногие десятки миллиметров.

Масса манипулятора изменяется в широких пределах: от нескольких десятков кг (сверхлегкие роботы) до  $1t$  и даже более, но обычной является масса в несколько сотен кг. Для самых различных подъемных и транспортных средств важным считается относительный показатель: **отношение массы полезного груза к массе самого средства**. Для большинства промышленных роботов значения этого показателя очень малы, не выше 5 %, а в среднем – 3 %. Для мини-роботов этот показатель еще значительно меньше.

<sup>2</sup>Переносные степени подвижности определяются поступательными и вращательными движениями манипулятора ПР. Ориентирующими движениями называют перемещения захватного устройства (инструмента), соразмерные с его параметрами.

Большая масса типового промышленного робота, в десятки раз больше массы переносимого объекта. Объясняется традициями машиностроения, а также тем, что робот рассматривается как грубое оборудование, которое не должно ломаться при грубом обращении, при случайных ударах, при падениях и пр. Поэтому сверхлегкие роботы рассчитываются не на малую массу предмета, а на силу рабочего. Если бы, по крайней мере, в некоторых производствах отношение к роботам было, как к приборам, их масса могла бы быть значительно меньше при той же грузоподъемности.

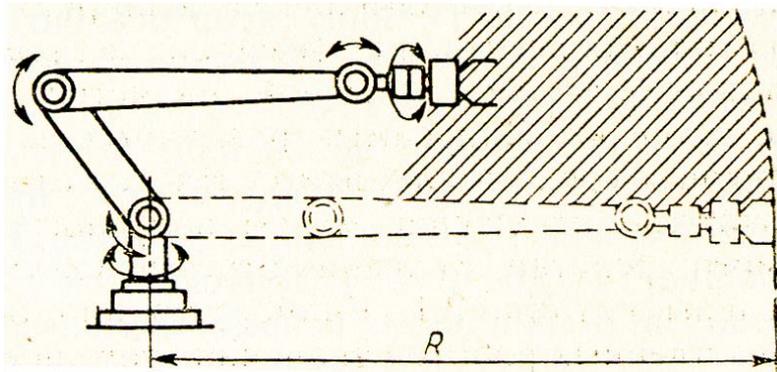


Рис. 1.17. Робот с шарнирной рукой

Второй тип представляет **напольный вспомогательный или технологический промышленный робот** с шарнирной рукой. Обычно такой робот (рис. 1.17) имеет пять степеней подвижности (три переносные и две ориентирующие),

устройство управления – позиционное или контурное, на основе числового программного управления (ЧПУ).

Главным, параметром считается грузоподъемность, зависимыми считаются два параметра: радиус рабочей зоны  $R$  и масса манипулятора  $M$ . При одной и той же грузоподъемности обычно радиус рабочей зоны получается больше, чем для роботов, работающих в цилиндрической системе координат, и часто превышает 2 м. Диапазон грузоподъемностей для роботов этого типа не очень широк: преимущественно 5...80 кг. Масса манипулятора обычно составляет несколько сотен кг, отношение грузоподъемности к массе манипулятора также составляет единицы процентов. Большинство роботов второго типа имеют гидравлический и электромеханический приводы.

К третьему типу относятся **портальные промышленные роботы**, имеющие одну или несколько качающихся рук (рис. 1.18). Обычно они имеют одну межпозиционную степень подвижности (перемещение каретки по траверсе), каждая рука имеет три степени подвижности (две переносные и одну ориентирующую).

Портальные роботы могут обслуживать по одной или по несколько единиц оборудования, поставленных в ряд. Грузоподъемность портальных роботов изменяется не в очень широких пределах: 20...200 кг, устройство управления – обычно цикловое, привод – электромеханический.

Основным геометрическим параметром является ход каретки по траверсе, он изменяется от 3 м (когда робот обслуживает один станок) до 16 м (когда робот обслуживает несколько станков).

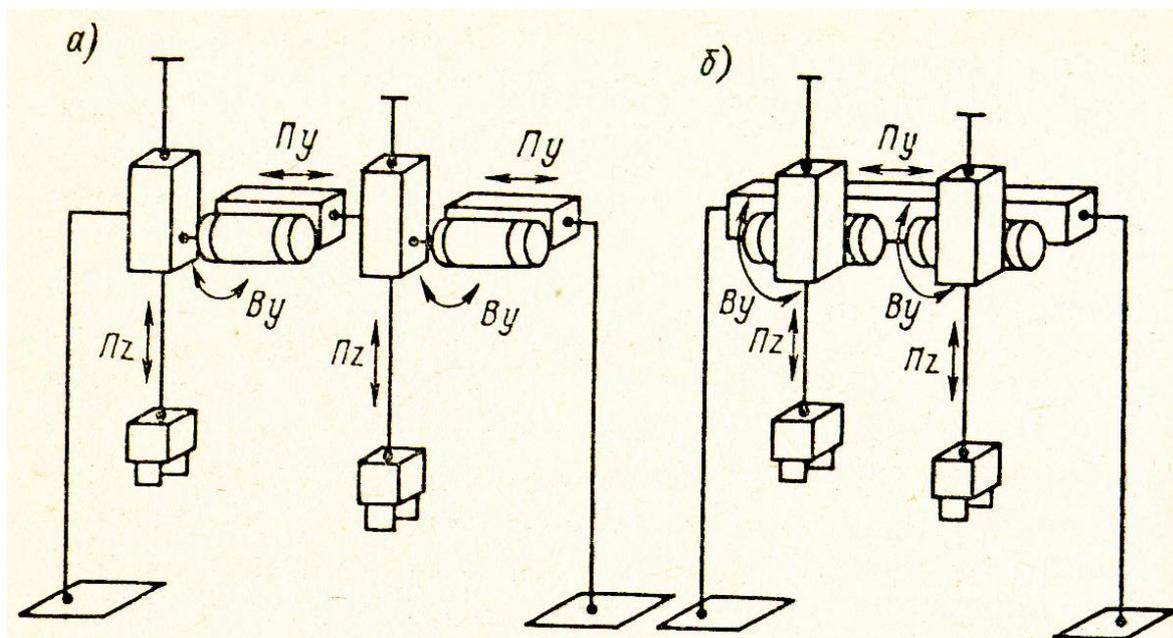


Рис. 1.18. Портальный ПР с независимыми манипуляторами:  
 а – двухтележечный; б – однотолежечный

Поперечные размеры рабочей зоны изменяются от 1 до 2,5 м. Основная доля массы робота приходится на портал, обычно его масса составляет несколько тонн.

В четвертый тип должны быть выделены **встроенные промышленные роботы**. Они разнообразны по схемам. Их характерными особенностями являются малые ходы (поскольку манипулирование осуществляется в непосредственной близости от рабочей зоны) и значительно меньшие массы (манипулятор обычно крепится к станине станка и не имеет собственного основания).

Относительно других технических характеристик необходимо дать следующие пояснения. Максимальные абсолютные погрешности определяются преимущественно назначением промышленных роботов. Наибольшие погрешности (до 10 мм) допускаются для окрасочных роботов. Большинство вспомогательных и технологических роботов имеют максимальные погрешности от нескольких десятых до 2...3 мм.

Наибольшую точность должны иметь сборочные роботы; согласно па спорным данным, погрешности некоторых моделей не превышают 0,02...0,05 мм, что, по-видимому, близко к пределу технических возможностей на настоящее время.

Линейные скорости перемещений (средние) изменяются в довольно узких пределах: 0,3...1,0 м/с. Они выше для роботов с пневмоприводом и ниже для роботов с электроприводом. Специальными техническими средствами удается повысить скорость до 4 м/с, но не в серийных, а в экспериментальных моделях.

Угловые скорости зависят от вида степеней подвижности: для переносных степеней подвижности они составляют обычно 30...90 °/с, а для ориентирующих – 180 °/с и больше.

Максимальные значения ускорений обычно в паспортах и технических описаниях не приводятся, хотя это требуется по стандарту. Результаты экспериментальных исследований, проведенных в разных организациях с различными моделями роботов, показывают, что наибольшие значения получаются для роботов с пневмоприводом.

При позиционировании по упорам (с демпферами) максимальные значения ускорений торможения могут достигать 100...150 м/с<sup>2</sup>, причем значения ускорений сильно зависят от настройки демпфера. Подобные большие значения ускорений неприятны тем, что схват и некоторые другие напряженные элементы конструкции приходится рассчитывать на динамические нагрузки, не менее чем в 20 раз превышающие силы веса. Для гидравлического и электромеханического приводов, особенно при контурном управлении, максимальные значения ускорений оказываются значительно меньше.

Параметры питания роботов определяются типом привода.

Для роботов с пневмоприводом давление воздуха составляет номинально 0,5 или 1,0 МПа; обычно требуется, чтобы работоспособность сохранялась при снижении давления на 20 или даже 30 %.

Промышленные роботы с электромеханическим приводом обычно питаются непосредственно от силовой сети переменного тока напряжением 220 или 380 В. Роботы с гидроприводом обычно имеют самостоятельную гидростанцию, насос которой приводится в движение электродвигателем. Некоторые роботы требуют двойного питания (сжатый воздух и электричество). Показатели надежности, указываемые в документации, обычно существенно отличаются от реальных. Средняя наработка на отказ обычно составляет десятки часов, редко немногие сотни. Ставится и решается задача повышения средней наработки на отказ до 1000 ч и более.

## **1.8. Параметры технического уровня роботов**

Наряду с классификационными параметрами роботы характеризуются параметрами, которые обуславливают их технический уровень. К ним относятся и некоторые из рассмотренных выше параметров, которые могут иметь количественное выражение: *быстродействие; точность, объем памяти; число каналов связи с внешним оборудованием* и др. При использовании этих параметров для классификации роботов их разбивают на группы и т.о. определяют тип робота, а сравнительную оценку его технического уровня производят исходя из конкретных численных значений следующих параметров: *надежность; число одновременно работающих степеней подвижности; время программирования; удельная грузоподъемность,*

отнесенная к массе робота; выходная мощность манипулятора – произведение грузоподъемности на скорость перемещения, отнесенная к мощности его приводов:  $W = G \times V / N$ ; относительные оценки габаритных параметров, манипуляционных кинематических и динамических характеристик, управляемости робота, возможностей программирования, экономической эффективности и т. п.

### 1.9. Системы координат роботов

Система координат (СК), или система координатных перемещений, ПР определяет кинематику основных движений и форму рабочей зоны (зоны обслуживания манипулятора). Системы координат бывают двух видов: прямоугольные и криволинейные.

**Базовые системы координат манипулятора.** Число степеней подвижности и каждое движение робота обеспечивается соответствующей кинематической схемой его механизмов. Кинематические схемы роботов имеют определенные структуры кинематики рук и кисти, которые зависят от вида и последовательности расположения вращательных (В) и поступательных (П) кинематических пар. Разработана классификация кинематических структурных схем руки и манипуляторов, состоящая из пар:

- 1 – ВВВ, трех вращательных;
- 2 – ВВП, двух вращательных и одной поступательной;
- 3 – ПВП, ВПП, ППВ, двух поступательных и одной вращательной;
- 4 – ППП – трех поступательных.

Форма рабочей зоны и возможности манипулирования объектом также определяются кинематической структурной схемой кисти манипулятора (жесткая, В, ВВ, ВВВ).

Характер переносных степеней подвижности (поступательных и вращательных) определяет базовую систему координат манипулятора. Если поступательных переносных степеней подвижности три ( $\Pi = 3$ ), а вращательных вообще нет ( $V = 0$ ), то базовая система координат является прямоугольной, а рабочая зона имеет форму параллелепипеда (рис. 1.19). Частный случай – плоская прямоугольная система координат, когда объект манипулирования перемещается в одной плоскости за счет 2-х взаимно перпендикулярных направлений. Если перемещение объекта происходит в одной плоскости в направлении радиус-вектора  $\rho$  и угла поворота  $\varphi$ , то это плоская полярная СК (рис. 1.20).

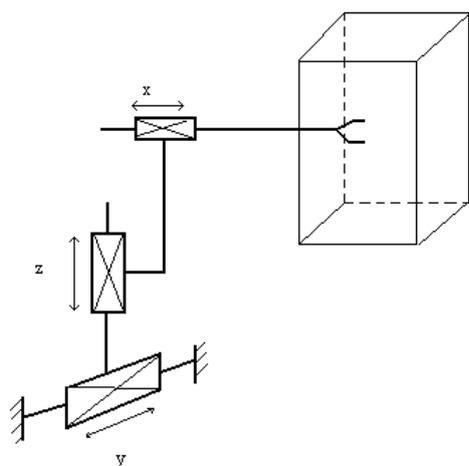


Рис. 1.19. Прямоугольная система координат

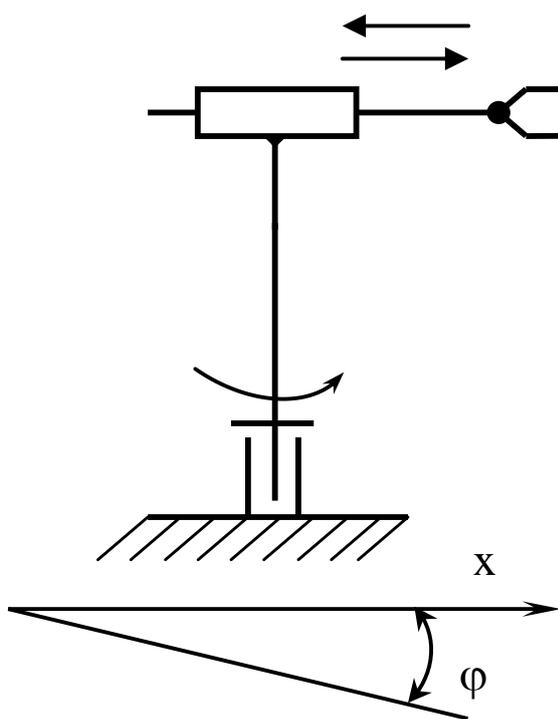


Рис. 1.20. Плоская полярная СК

ток, связанный с трудностью организации манипулирования предметами на малой высоте.

Если  $\Pi=1$ ,  $V=2$ , то рабочая зона представляет собой неполный шар, а базовая система координат  $R, \theta, \varphi$  является сферической. Это наиболее универсальная система координат (рис. 1.22). Она обеспечивает обслуживание большего объема рабочей зоны, чем при прямоугольной и цилиндрической системах координат. Но конструкция манипулятора в этом случае получается более сложной, а ПР нуждается в более сложной системе управления.

Плоские полярные, цилиндрические и сферические перемещения объекта манипулирования являются наиболее распространенными в криволинейной СК. Разновидностью последней являются угловая (угловая) плоская и угловая пространственная (цилиндрическая или сферическая) СК. При  $\Pi=0$ ,  $V=3$  получают угловую (угловую) базовую систему координат  $\gamma, \theta, \varphi$  (рис. 1.23).

Несмотря на простоту конструкции, ПР с такой системой координат встречаются довольно редко, т.к. имеют большие габариты при малом объеме рабочей зоны и характеризуются сравнительно невысоким быстродействием. Такие роботы обычно либо подвешиваются над обслуживаемым технологическим оборудованием, либо монтируются на направляющих каретках под ним.

В случае, когда  $\Pi=2$ ,  $V=1$ , рабочая зона ПР приобретает цилиндрическую форму – форму неполного цилиндра (рис.1.21).

Соответствующая этому случаю базовая СК  $R, H, \varphi$  удобна и получила большое распространение. Она обеспечивает обслуживание большого объема рабочей зоны, но имеет недоста-

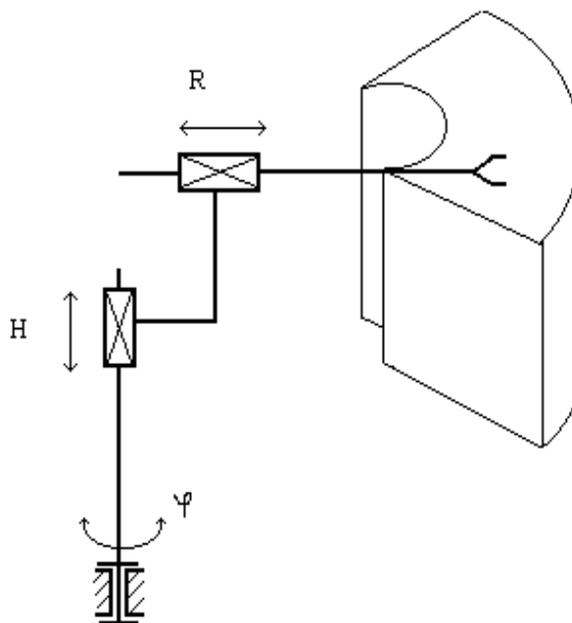


Рис. 1.21. Цилиндрическая СК

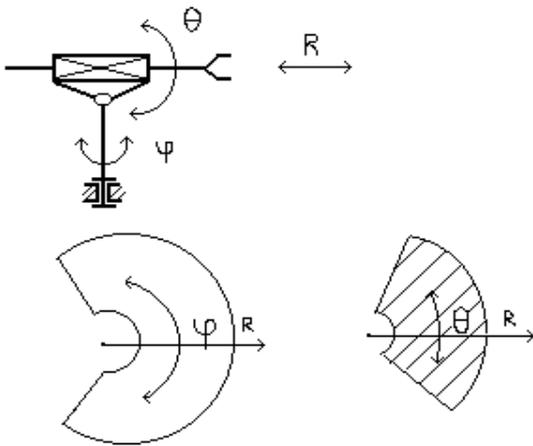


Рис. 1.22. Сферическая СК

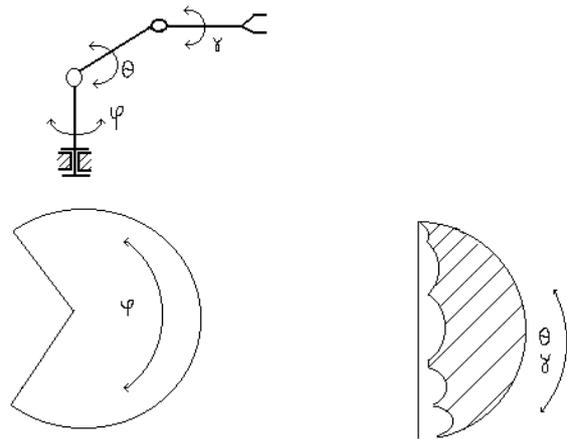


Рис. 1.23. Ангулярная СК

*В ангулярной плоской СК объект манипулирования перемещается в координатной плоскости благодаря относительным поворотам звеньев руки  $M$ , имеющих постоянную длину.*

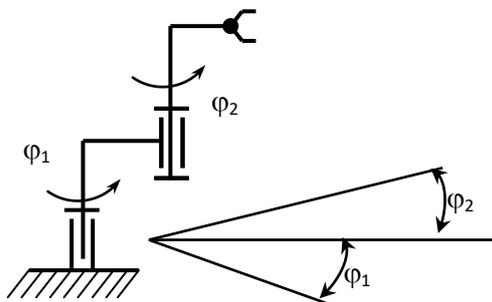


Рис. 1.23.1.

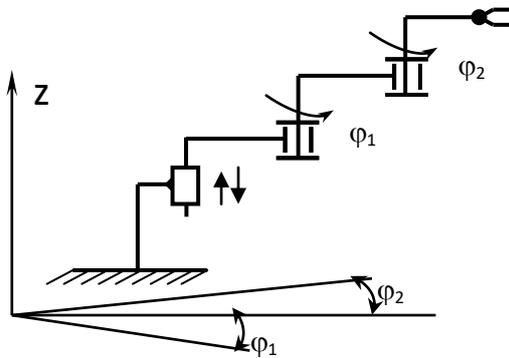


Рис. 1.23.2.

*Ангулярная цилиндрическая СК характеризуется дополнительным смещением руки  $M$  относительно основной координатной плоскости в направлении перпендикулярной к ней координаты  $z$ .*

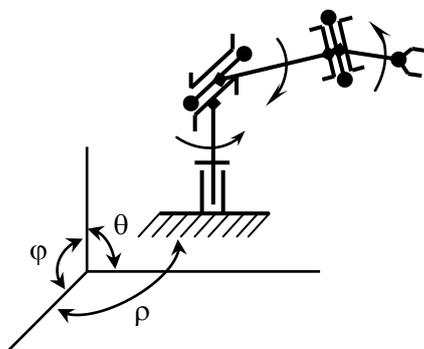


Рис. 1.23.3.

*В ангулярной сферической СК перемещение объекта в пространстве происходит только за счет относительных угловых поворотов звеньев руки  $M$ . При этом хотя бы одно звено должно иметь возможность поворота на углы \$\varphi\$ и \$\theta\$ в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.*

Ангулярная система координат наиболее универсальна, обеспечивает обслуживание наибольшего объема рабочей зоны и позволяет строить ПР, обладающие максимальной антропоморфностью. Однако конструкция манипулятора очень сложна, громоздка и предполагает сложную систему управления. Недостатком является также то, что жесткость манипулятора в ней понижена, из-за чего возникают трудности обеспечения необходимой точности позиционирования.

Прямоугольная система координат реализуется тремя поступательными кинематическими парами, цилиндрическая – двумя поступательными и одной вращательной, сферическая – двумя вращательными и одной поступательной, *угловая – тремя вращательными.*

## **2. Структурные и кинематические схемы манипуляторов**

### **2.1. Степени подвижности и кинематические пары**

Наглядное представление о манипуляторе ПР и возможностях его движений дает структурная схема. На структурной схеме известными из структуры механизмов условными обозначениями показывается стойка (неподвижное основание), подвижные звенья, кинематические пары с указанием их вида и взаимного расположения. Схема изображает как бы скелет механизма.

Со структурной схемы обычно начинается проектирование механизма манипулятора ПР. Но схема нужна не только проектировщикам. При выборе ПР по чертежам или образцам важно увидеть схему в готовой конструкции. Именно по схеме строятся эскизы расстановки оборудования. В механизмах манипуляторов используются практически только одноподвижные кинематические пары: поступательные (линейные), и вращательные (поворотные). В дальнейшем они на схемах изображаются соответственно, как на рис. 2.1а,б. Каждой степени подвижности при этом соответствует одна кинематическая пара. ***Степени подвижности исполнительных устройств ПР делятся на три группы: межпозиционные, переносные и ориентирующие.***

*Межпозиционная* степень подвижности обычно реализует устройство передвижения типа тележки, перемещающейся по рельсовому пути по полу или по ригелю портала. Диапазон перемещений при этом составляет несколько метров. Если ПР имеет устройство передвижения, то оно обычно имеет одну степень подвижности (поступательную). *Переносные и ориентирующие* степени подвижности реализуются в манипуляторе. *Кинемати-*

ческие пары переносных степеней подвижности могут быть поступательными (П) или вращательными (В), соответствующие линейные перемещения обычно имеют порядок нескольких десятков или одного метра.

Кинематические пары ориентирующих степеней подвижности обязательно являются вращательными. Разделение степеней подвижности на ориентирующие и переносные иногда является условным, поскольку при вращательных переносных движениях одновременно изменяется и ориентация.

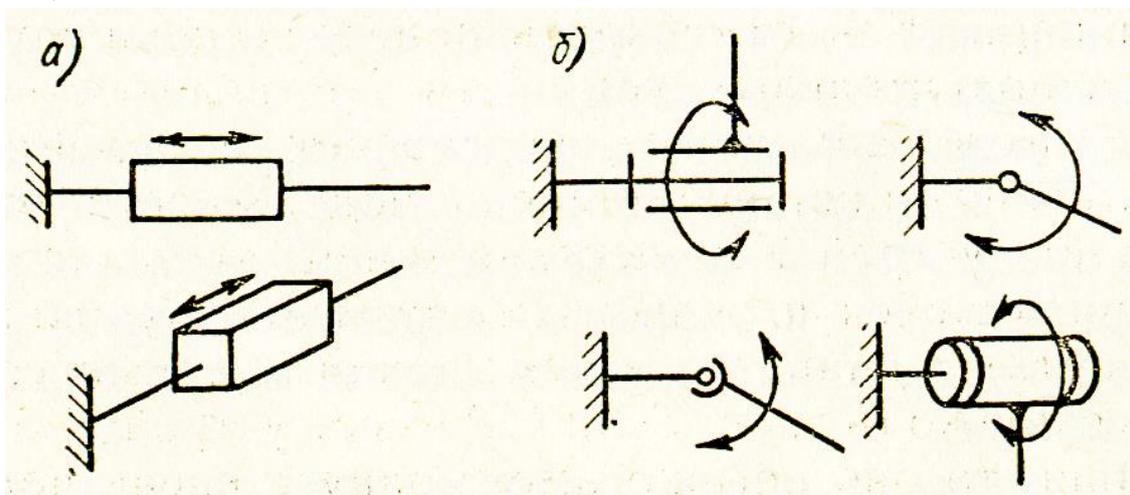


Рис. 2.1. Одноподвижные кинематические пары:  
а – поступательные; б – вращательные

Удобно рассматривать степени подвижности по группам: отдельно переносные и отдельно ориентирующие. Когда рассматриваются только переносные степени подвижности, переносимый объект можно считать точкой. Общий вид манипулятора и его возможности определяются переносными степенями подвижности, поэтому сначала будем учитывать только их. При классификации схем важны число степеней подвижности, вид кинематических пар и расположение их осей относительно друг друга и определенных направлений.

Ориентацию осей кинематических пар будем определять в определенным образом выбранной прямоугольной системе координат. Ось  $z$  направляется по вертикали вверх. Направление осей  $x$  и  $y$  лежащих в горизонтальной плоскости, могут иногда быть произвольными, но часто их удобно связывать с расстановкой обслуживаемого оборудования или с характерными плоскостями самого механизма манипулятора. Если механизм манипулятора, как это часто бывает, имеет вертикальную плоскость симметрии, то ось  $x$  направляется именно в этой плоскости; тогда ось  $y$  по смыслу является боковой.

Если можно считать условно заданной лицевую вертикальную плоскость обслуживаемого оборудования, то ось  $x$  задается перпендикулярно ей; ось  $y$  при этом также является боковой. Далее каждая схема бу-

дет иметь свое буквенно-цифровое обозначение. Каждая кинематическая пара будет обозначаться тремя символами: номером пары, буквой П или В (П означает, что пара поступательная, В – что пара вращательная) и буквой  $x$ ,  $y$  или  $z$  (показывающей, по какой из осей направлена ось кинематической пары). Для рассматриваемой схемы такие буквенно-цифровые обозначения кинематических пар выписываются друг за другом, начиная от стойки (неподвижного основания). Как отмечалось ранее, обычно отдельно рассматриваются схемы только для переносных степеней подвижности, но иногда в схему включают также и межпозиционную степень подвижности.

Манипуляторы всех известных промышленных роботов (ПР) имеют не менее двух переносных степеней подвижности, подробные классификации построены для случаев двух и трех переносных степеней подвижности. Все возможные варианты схем можно получить, перебирая их в определенном порядке, по определенному правилу, однако дальше обращается внимание только на те схемы, которые представляют практический интерес и нашли достаточно широкое применение.

## 2.2. Критерии сравнения кинематических схем

Схемы необходимо сравнивать, сопоставляя их достоинства и недостатки. Далее перечислены факторы и обстоятельства, которые следует учитывать при сравнении схем самих по себе и конструкций, выполняемых по этим схемам.

**Степень распространенности** и "привычности" схем в ПР и в другом оборудовании. Естественно отдавать предпочтение тем схемам, которые нашли широкое применение и хорошо зарекомендовали себя. Иногда традиционные схемы могут оказаться устаревшими.

**Размеры и объем рабочей зоны** при заданной ограниченной длине звеньев. Здесь преимущества имеют схемы с вращательными кинематическими парами. Это наглядно показано на рис. 2.2: при одинаковой длине звеньев размер рабочей зоны для второй схемы (рис. 2.2б) в четыре раза больше, чем первой (рис. 2.2а). Если же заданы размеры рабочей зоны, то манипулятор с вращательными кинематическими парами оказывается более компактным.

**Размеры и объем рабочего пространства**, т.е. пространства, в которое могут попадать подвижные части механизма. Для схемы с вращательными кинематическими парами рабочее пространство практически совпадает с рабочей зоной.

Для схемы с поступательными парами рабочее пространство значительно больше, чем рабочая зона. Схемы с вращательными парами дают экономию рабочего пространства.

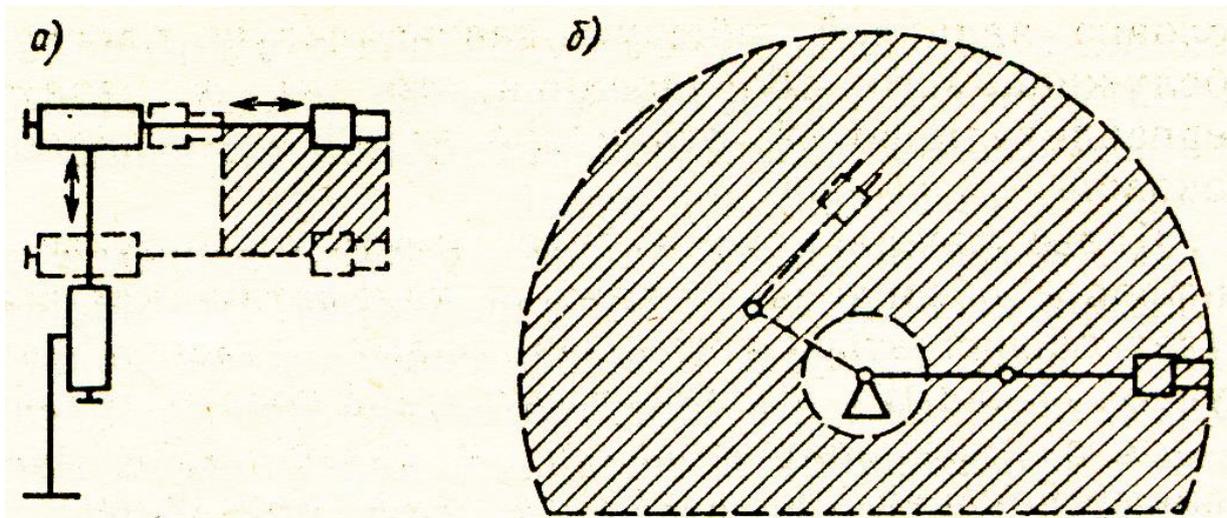


Рис. 2.2. Параметры рабочих зон

**Общий вид свободной зоны** (без препятствий для работы робота). При поступательном прямолинейном движении звена (руки) должен оставаться свободным узкий коридор (рис. 2.3а), при повороте – гораздо более широкая зона (рис. 2.3б). Когда не обходимо обслуживать оборудование с узкой рабочей зоной (прессы, печи) преимущества имеют схемы по крайней мере с одной поступательной степенью подвижности (с выдвигной рукой).

**Размер площади основания манипулятора** (если ПР напольный). Эта площадь может быть сделана меньше, если первой является кинематическая пара (поступательная или вращательная – безразлично) с осью, направленной по оси  $z$ . Если ПР является подвесным, то указанное обстоятельство не имеет значения,

**Вид траекторий перемещаемого объекта** при движении по каждой из степеней подвижности. Чаще всего предпочтительными являются прямолинейные траектории (например, при автоматической сборке), которые получаются при поступательных парах.

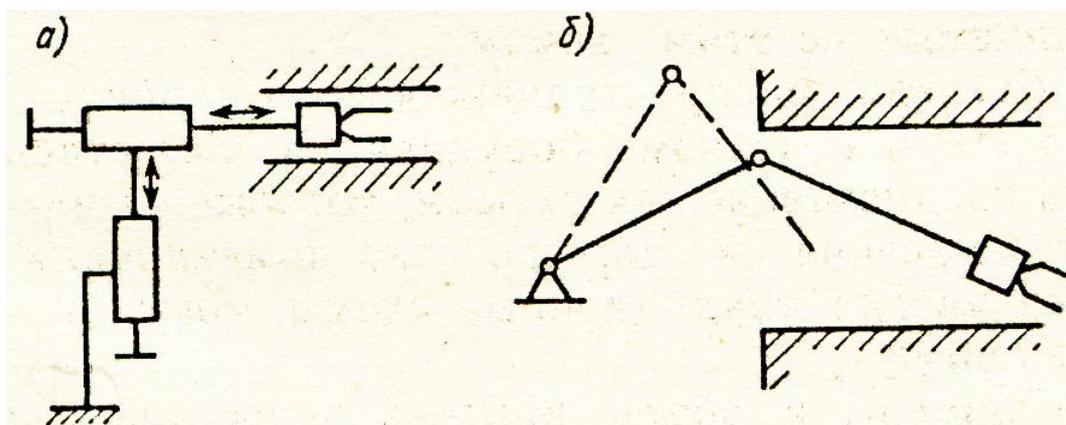


Рис. 2.3. Свободные от препятствий рабочие зоны,

**Простота программирования движений рабочих органов** технологических ПР. Известно, что проще всего программирование осуществляется в прямоугольных координатах, т.е. для ПР со всеми поступательными степенями подвижности. Именно такую кинематику обычно имеет традиционное технологическое оборудование.

**Сохранение или изменение ориентации рабочего органа** (захватного устройства) при перемещениях по степеням подвижности. Желательно, чтобы при переносе ориентация рабочего органа оставалась неизменной, т.е. чтобы он перемещался параллельно самому себе. Если это не обеспечивается, то механизмы ориентирующих степеней подвижности, должны задавать компенсирующие повороты (на ту же величину в противоположную сторону). Сохранение ориентации при любых переносных движениях имеет место только тогда, когда все степени подвижности – поступательные. Чем больше вращательных степеней подвижности, тем большее число ориентирующих степеней подвижности должно принимать участие в осуществлении компенсирующих вращений. Применение параллелограммных шарнирно-рычажных механизмов типа пантографа позволяет сохранять ориентацию рабочих органов при их переносе.

**Погрешность положения рабочего органа**, обусловленная погрешностью путевого датчика, упора или измерительного преобразователя. Как правило, поступательные пары дают погрешности положения рабочего органа на порядок меньше, чем вращательные пары. Объясняется это следующим образом. Пусть  $\delta_0$  – погрешность путевого упора. Тогда для поступательной степени подвижности погрешность положения рабочего органа  $\Delta_1 = \delta_0$  (рис. 2.4а,б). Для вращательной степени подвижности расстояние  $r$  упора до точки поворота  $O$  значительно меньше расстояния  $R$  рабочего органа до точки поворота. Поэтому погрешность положения рабочего органа  $\Delta_2 = (R/r)\delta_0$  оказывается значительно больше (погрешности положения упора в обоих случаях считаются одинаковыми).

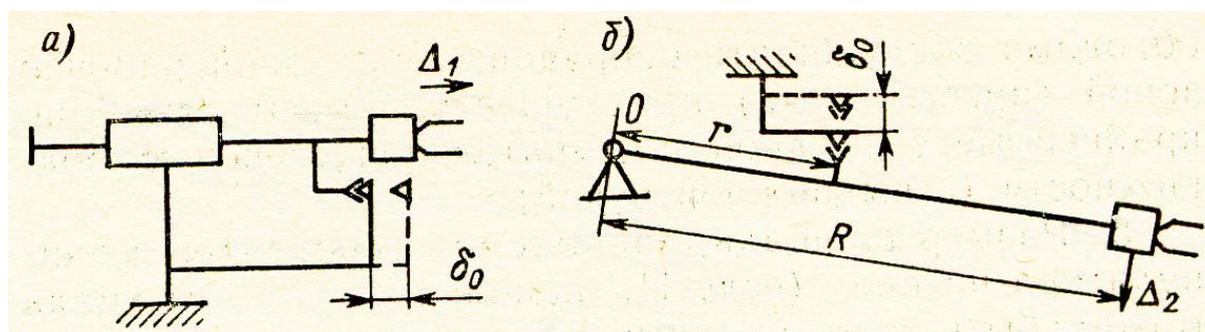


Рис. 2.4. Погрешности положения рабочего органа ПР

**Степень разнообразия кинематических пар** по манипулятору. Желательно, чтобы в конструкции использовались только одинаковые кинематические пары. Это дает возможность унифицировать узлы и приводы.

**Технологичность изготовления и сборки узлов**, реализующих кинематические пары. Как правило, конструкции с вращательными парами являются более технологичными. Проектирование, изготовление деталей, сборка и регулировка подшипниковых узлов значительно проще, чем направляющих с подвижными каретками.

**Возможность построения вариантов ПР** как с нижним расположением (напольных), так и с верхним расположением (подвесных) манипуляторов; либо с установка манипулятора на вертикальной плоскости. Такое разнообразие допускают не все схемы.

**Возможность ужесточения конструкций** путем замены консолей двухопорными элементами. Для поступательных степеней подвижности это, как правило, легко выполнимо (рис. 2.5а,б).

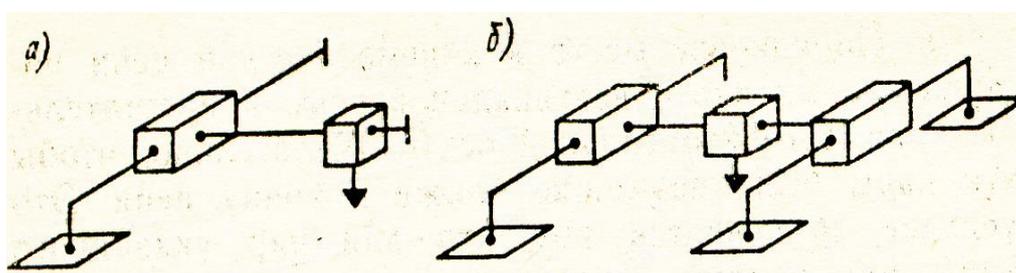


Рис. 2.5. Замена консолей двухопорными элементами

Для вращательных степеней подвижности устранение консолей возможно только в некоторых случаях.

**Массогабаритные характеристики.** Обычно конструкции манипуляторов с поступательными кинематическими парами оказываются более громоздкими и тяжелыми, чем конструкции с вращательными парами.

**Степень согласованности с двигателями**, приводящими в движение звенья. Предпочтительна прямая передача, когда перемещаемое звено жестко связано с выходным звеном двигателя. Так получается, когда выдвижная рука представляет собой шток пневмоцилиндра или качающееся звено поворачивается от поворотного гидродвигателя, находящегося на том же валу.

**Значения мощности или работы сил** или моментов сил трения. Часто эти значения малы, но все же следует иметь в виду, что при одинаковых линейных перемещениях вращательных пар расходуемая мощность или работа обычно оказывается меньше, чем поступательных.

**Соотношение между суммарными массами подвижных частей, участвующих в различных движениях.** Желательно, чтобы в более точных движениях (например, при установке заготовки в патрон) участвовали меньшие массы. Желательно, чтобы в перемещениях на большие расстояния (в перемещениях по степеням свободы с большими ходами) участвовали меньшие массы.

**Порядковое место в кинематической цепи** поступательных пар с

вертикальной осью и вращательных пар с горизонтальной осью. Желательно, чтобы эти пары были как можно ближе к концу цепи. Это условие объясняется тем, что для пар указанного типа сила тяжести создает дополнительные нагрузки, так как при таких движениях происходят вертикальные перемещения. Уравновешивание звеньев несколько устраняет влияние этого фактора.

**Возможности разгрузки, статического и динамического уравновешивания механизма манипулятора** в целом и его отдельных частей. Средства разгрузки и уравновешивания могут быть пассивными (противовесы, пружины) и активными (пнеumoцилиндры, специальные электромагнитные устройства). Обычно для поступательных пар уравновешивание осуществляется проще и может быть сделано более точным.

**Возможности объединения в одном узле механизмов двух или большего числа степеней подвижности.** Обычно является удобным объединение в одном узле поступательной и вращательной кинематических пар с одной и той же осью.

**Возможность защиты подвижных соединений звеньев** от пыли, влаги, рабочих жидкостей и пр. Такая защита осуществляется с помощью крышек, кожухов и т.п. Для узлов с вращательными парами подобные средства оказываются более простыми и надежными.

Учитывая перечисленные обстоятельства, сравним наиболее распространенные схемы и оценим их применение в ПР различного назначения.

### 2.3. Схемы манипуляторов с двумя степенями подвижности

При двух переносных степенях подвижности рабочий орган манипулятора может перемещаться только по определенной поверхности (в частном случае – по плоскости). Конкретный вид этой поверхности особенно важен для технологических ПР, у которых траектория рабочего органа должна покрывать участки поверхностей обрабатываемого изделия. Для вспомогательных ПР важно обеспечить возможность переноса объекта из одной точки в другую, а по какой поверхности перемещается захватное устройство – не так существенно. Рассмотрим сначала схему вида **1Пу 2Пхс** двумя поступательными кинематическими парами, оси которых горизонтальны (рис. 2.6а).

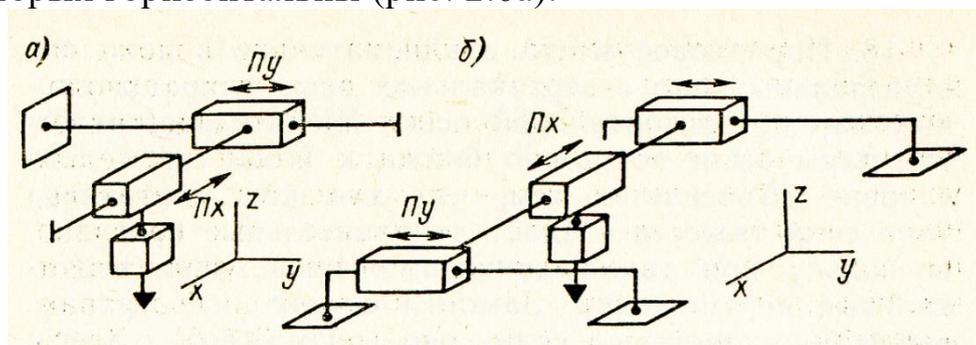


Рис. 2.6. Точность и жесткость конструкции

Эта схема обычна для различных технологических установок и станков, предназначенных для обработки плоских поверхностей, например для нанесения покрытий. Эта схема также обычна для двухкоординатных станков, графопостроителей, а также устройств более сложных по кинематике машин.

По этой схеме выполняются конструкции манипуляторов технологических ПР, предназначенных для резки (газовой, плазменной, лазерной) плоских листов, раскроя, окраски плоских поверхностей, измерения или контроля параметров отклонения от плоскостности. Рабочая зона представляет собой плоский прямоугольник.

Схема реализует плоскую прямоугольную систему координат, программирование движений в которой удобнее всего. Поскольку кинематические пары являются поступательными, схема дает возможность получения высокой точности.

Повышение жесткости достигнуто заменой консолей двухопорными элементами, как показано на рис. 2.6б. Однако конструкция является громоздкой, имеются трудности в защите направляющих и элементов передач (это важно, если ПР – окрасочный). Большинство ПР с такой схемой имеет электропривод, причем передача движения: от вала электродвигателя осуществляется с помощью винтовой передачи (ходовой винт-гайка). Схема вида  $1\Pi y 2\Pi z$  получается из предыдущей поворотом плоскости, которая была горизонтальной, в вертикальное положение манипулятор с такой схемой занимает меньше площади.

Однако такое положение рабочей плоскости допустимо не для всех технологических процессов. Привод, который осуществляет вертикальное перемещение, находится в более тяжелых условиях. Чтобы уменьшить нагрузку на этот двигатель, проще всего использовать противовес, как показано на рис. 2.7а.

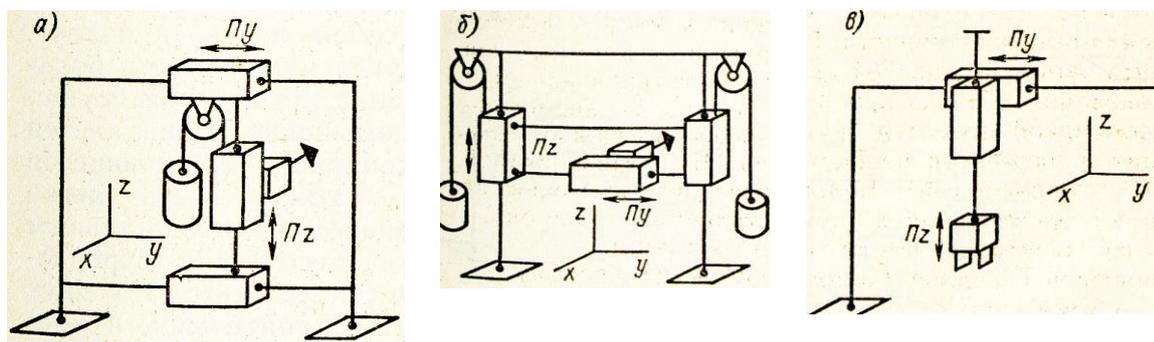


Рис. 2.7. Противовесы, опоры и консоли

Противовес, конечно, увеличивает массу подвижной части. Очень близкой по свойствам является схема вида  $1\Pi z 2\Pi y$  (рис. 2.7б). Здесь для уравнивания используются два противовеса.

При выборе между двумя последними схемами в первую очередь принимается во внимание то, по какой из координат необходимо иметь большие перемещения рабочего органа. Является предпочтительным, чтобы больший ход был по первой из степеней подвижности. Поэтому схема на рис. 2.7а приспособлена для случаев, когда нужен большой горизонтальный ход; при этом горизонтальные направляющие могут крепиться на специальной неподвижной несущей конструкции. Схема вида **1Пу 2Пз** иногда используется также в манипуляторах вспомогательных роботов-перекладчиках. При этом выдвигная рука, перемещающаяся вертикально, обычно является консольной, верхняя балка, по которой происходит горизонтальное перемещение, может быть двухопорной или консольной (рис. 2.7в).

Рассмотрим теперь схему вида **1Вз 2Пх** (рис. 2.8а) с одной вращательной и с одной поступательной кинематическими парами. Рабочая зона для такой схемы представляет собой плоское кольцо, схема реализует плоскую полярную систему координат.

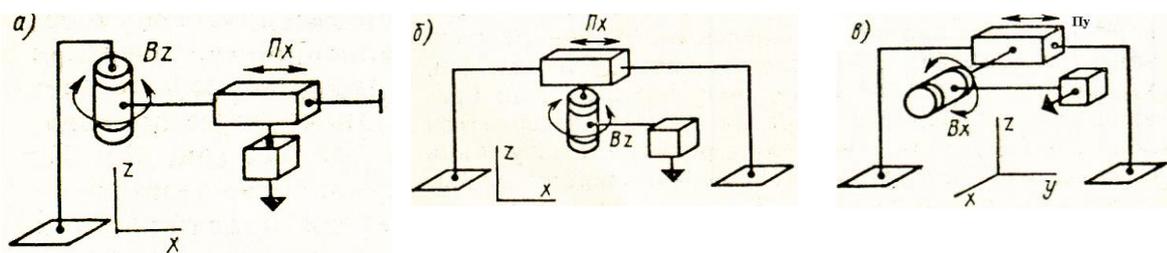


Рис. 2.8. Схемы манипуляторов с 2-мя степенями подвижности

Как и предыдущие схемы, она в основном применяется для манипуляторов технологических ПР, работающих с плоскими поверхностями. Из-за наличия вращательной пары точность схемы несколько ниже, чем предыдущих, причем точность может существенно изменяться при радиальном смещении рабочего органа. Обычно конструкция, выполненная по такой схеме, не может быть сделана очень жесткой, поэтому существенными становятся упругие деформации.

Вертикальные перемещения подвижных частей отсутствуют, поэтому силы тяжести не нагружают двигатели. Однако могут быть значительными изгибающие моменты для вертикального вала вращательной пары, поскольку уравнивание вращающейся части практически невозможно.

Схема вида **1Пх 2Вз** (рис. 2.8б) отличается от предыдущей схемы порядком следования кинематических пар. При достаточно больших поступательных перемещениях рабочая зона представляет собой плоскую полосу. Схема имеет преимущества, когда нужно иметь большой ход по оси  $x$ ; при этом балка, по которой осуществляется поступательное перемещение, выполняется двухопорной.

Вращающееся звено может быть легко уравновешено специальным противовесом или перераспределением масс. Из двух схем с поступательной и вращательной парами, и с вертикальной рабочей плоскостью преимущества имеет схема вида  $1\Pi z 2Bz$  (рис. 2.8в), так как направляющая большого поступательного перемещения неподвижна и горизонтальна, а вращающаяся часть может быть уравновешена. Для вспомогательных ПР последние схемы практически не применяются.

Для схемы вида  $1\Pi z 2Bz$  (рис. 2.9а) рабочая зона представляет собой цилиндрическую поверхность определенного радиуса. Поэтому подобная схема может быть использована в конструкциях технологических ПР только тогда, когда они являются специальными (например, предназначены для обработки изнутри труб постоянного диаметра). В то же время схема довольно широко используется в манипуляторах простейших роботов-перекладчиков. Как отмечалось ранее, сочетание вращательной и поступательной пар в одном узле дает конструктивные преимущества.

Более подходящей может оказаться схема вида  $1Bz 2\Pi z$  (рис. 2.9б). Здесь вертикальное перемещение, наиболее ответственное, совершается по второй степени подвижности и с меньшей массой.

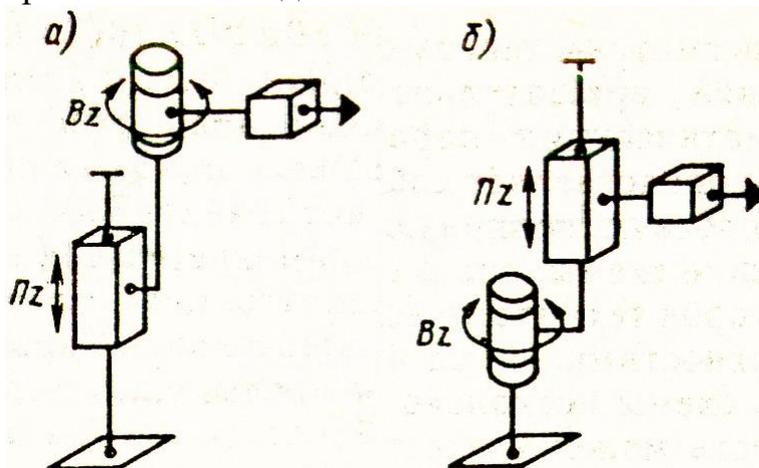


Рис. 2.9. Схемы манипуляторов с 2-мя степенями подвижности (продолжение)

Схема вида  $1Bz 2Bz$  (рис. 2.10а) имеет две вращательные пары с параллельными осями, рабочая зона представляет собой плоское кольцо. Конструкции, выполняемые по этой схеме, технологичны; если приводы электрические, для передач могут использоваться обычные редукторы; двигатели и редукторы могут быть одинаковыми для обоих приводов, что является дополнительным преимуществом.

Конструкции получаются более компактными, и легкими по сравнению с предыдущими. Кажется, что при двух консольных звеньях конструкция обязательно имеет низкую жесткость. Однако жесткость может быть значительно повышена путем разнесения подшипников по оси  $z$  (рис. 4.10б). В таком варианте схема используется в самых точных мани-

пуляторах. Программирование движений в биполярной системе координат, соответствующей рассматриваемой схеме, представляет определенные трудности, так как любые прямолинейные движения рабочего органа требуют совместной работы обоих приводов.

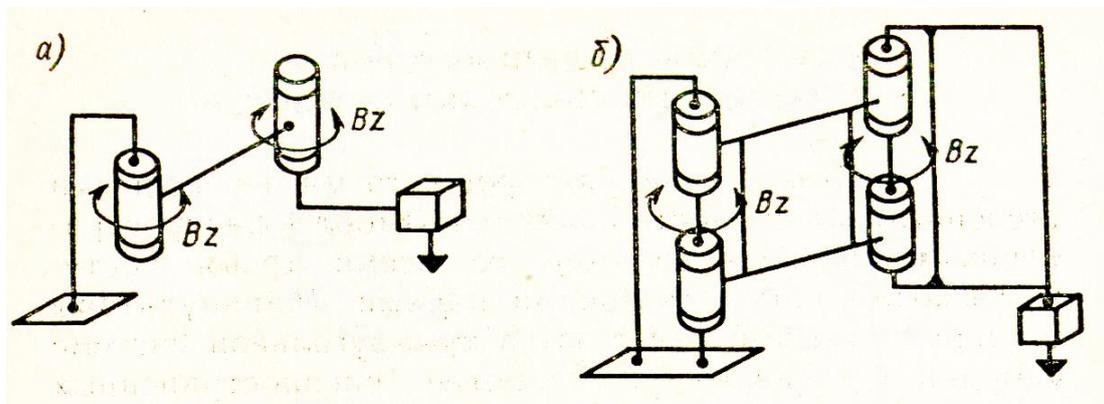


Рис. 2.10. Схемы манипуляторов с 2-мя степенями подвижности (окончание)

Применение схемы целесообразно в технологических ПР, например окрасочных. При этом наличие только вращательных пар облегчает защиту соединений от распыленной краски. Заметим, что двухзвенный механизм рассматриваемого вида с вертикальными осями пар входит в виде складной руки в состав более сложного механизма манипулятора. Поворот плоскости механизма из горизонтального положения в вертикальное почти никакой специфики не вносит, уравнивание проще всего достигается с помощью противовесов или перераспределения масс. Такой ПР может быть сделан как переключатель, но непрямолинейность движений захватного устройства при включениях приводов по отдельности сильно ограничивает возможности его применения.

В целом следует констатировать, что манипуляторы с двумя степенями подвижности встречаются преимущественно в автооператорах и специальных ПР с ограниченными возможностями. Однако иногда на их основе могут создаваться более сложные механизмы.

#### 2.4. Схемы манипуляторов с тремя степенями подвижности

Схемы манипуляторов с тремя переносными степенями подвижности являются наиболее распространенными. Начнем со схем со всеми тремя поступательными кинематическими парами. Манипуляторы с такими схемами работают в прямоугольной системе координат. Одной из наиболее распространенных является схема вида  $1Пх 2Пу 3Пz$ . Схема является распространенной, по этой схеме строятся мостовой кран, некоторые координатные станки.

Для манипуляторов, выполненных по такой схеме, типично верхнее расположение направляющих перемещению по осям  $x$  и  $y$ , рабочий орган пе-

ремещается под ними (рис. 2.11). По подобным схемам строятся манипуляторы сборочных и измерительных ПР, а также ПР, к рабочему органу которых прикладываются большие силовые воздействия. У вспомогательных ПР такие схемы встречаются редко, только когда ПР выполняют функции мостового крана и обслуживают оборудование со свободным доступом сверху. При обслуживании нескольких единиц оборудования горизонтальные перемещения соответствуют межпозиционным степеням подвижности.

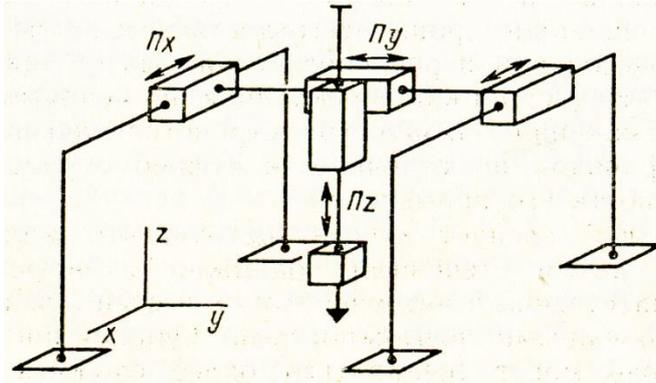


Рис. 2.11

Консольным является только последнее звено, перемещающееся вертикально. Вследствие этого упругие деформации под силами веса могут быть сделаны малыми.

Схеме присущи основные достоинства, типичные для манипуляторов с поступательными кинематическими парами (простота программирования движений,

возможность получения высокой точности, разгруженность первых кинематических пар, простота уравнивания, сохранение ориентации рабочего органа при переносе) и недостатки (громоздкость, большие массы, сложность сборки и регулировки, несогласованность кинематики движения с двигателями). В зависимости от ходов и требований к точности используются разные типы передач механизмов горизонтальных перемещений:

- винтовые (когда ходы не превышают двух метров и требуется высокая точность);
- зубчатые реечные (при больших и средних ходах и средней точности);
- цепные (при низкой точности).

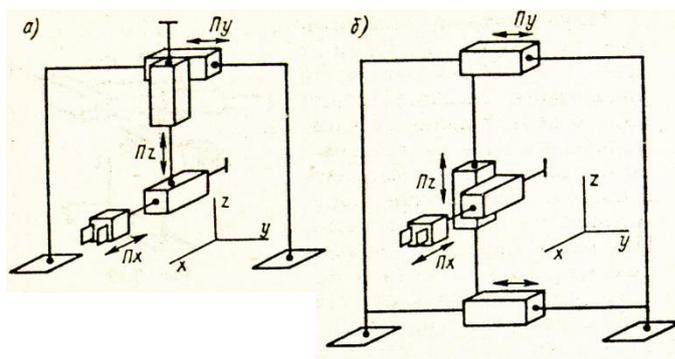


Рис. 2.12

Схема вида  $1Пy 2Пz 3Пx$ , в которой кинематическая пара с вертикальной осью является второй, имеет иные области применения. При большом ходе по оси  $y$  (тогда эта степень подвижности является межпозиционной) манипулятор оказывается приспособленным

для обслуживания оборудования, установленного в ряд с лицевыми поверхностями, перпендикулярными оси  $x$ , при этом введение захватного устройства в рабочие зоны оборудования осуществляется движением по последней степени подвижности – по оси  $x$ .

Конструкция манипулятора может быть подвесной (рис. 4.12а) или

с разнесенными по вертикали направляющими, т. е. с рельсовым путем в вертикальной плоскости (рис. 4.12б). Последний вариант характерен для манипуляторов-штабелеров, обслуживающих вертикальные стеллажи. Если достаточно малого хода по оси  $x$ , манипулятор требует достаточно узкого свободного пространства перед фронтом оборудования.

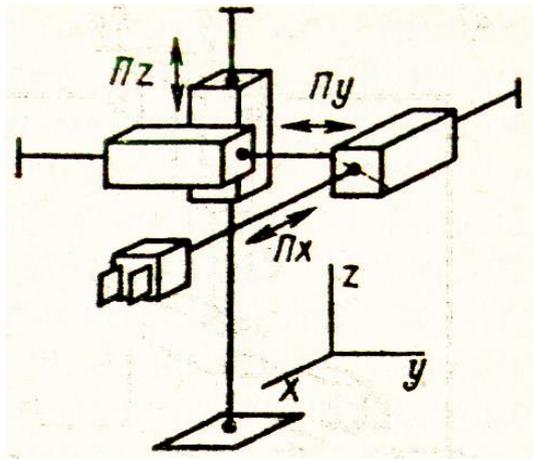


Рис. 2.13

Манипуляторы, выполняемые по схеме  $1Pz\ 2Py\ 3Px$  (рис. 2.13), обычно являются напольными. То обстоятельство, что первой является кинематическая пара поступательного перемещения, позволяет выполнять конструкции, занимающие на полу мало места. При малой опорной базе ходы по осям  $y$  и  $x$  должны быть малыми и соответствующие степени подвижности являются переносными, а не межпозиционными.

ПР с такой схемой обслуживает одну единицу оборудования с вводом в рабочую зону по оси  $x$ . По сравнению с другими напольными ПР, ПР с такой схемой являются более громоздкими, однако при малых ходах оказывается возможным получать высокую точность позиционирования. Из схем с двумя поступательными и одной вращательной парами наибольшее распространение получили схемы вида  $1Pz\ 2Vz\ 3Px$  (рис. 2.14а) и  $1Vz\ 2Pz\ 3Px$  (рис. 2.14б).

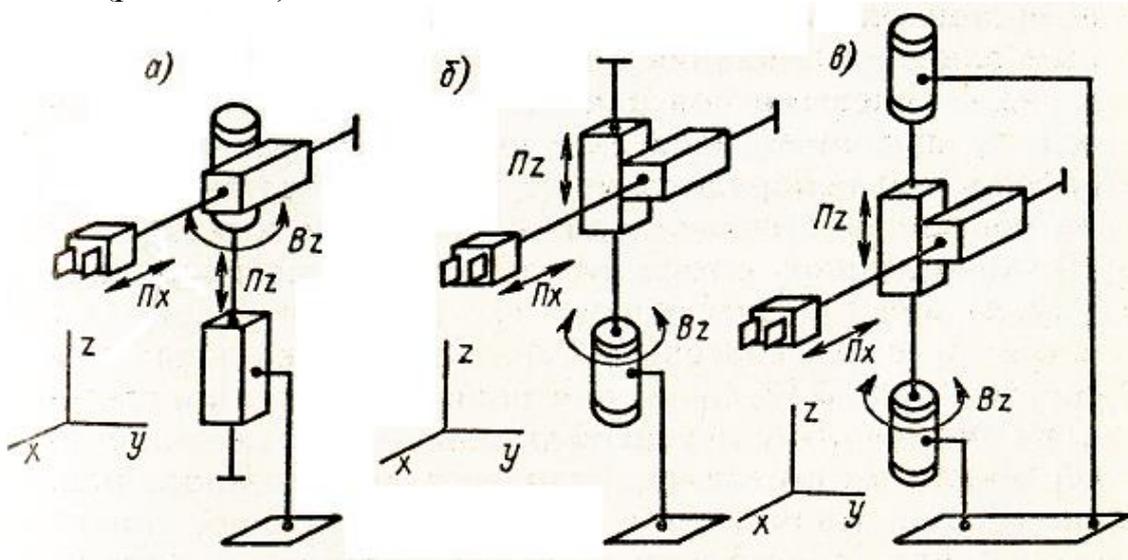


Рис. 2.14

Обе схемы чаще всего реализуются в напольных ПР, работающих в цилиндрической системе координат. В настоящее время такие ПР с пневмоприводом, достаточно простые и дешевые, составляют большинство

парка. Однако имеется тенденция к снижению их относительного числа. Для обеих схем характерна горизонтальная выдвигная рука, ее выдвигание осуществляется по последней степени подвижности. Механизм выдвигания хорошо согласуется с приводом, если двигателем является пневмоцилиндр. Силой тяжести нагружен только привод перемещения по оси  $z$ , однако при использовании пневмопривода, а тем более гидропривода нет необходимости в механизмах разгрузки или уравнивания. Две следующие друг за другом вращательная и поступательная пары с параллельными осями удобны для компоновки. При выборе последовательности этих двух пар учитывается в первую очередь громоздкость и относительная масса соответствующих механизмов.

Иногда механизм поворота имеет в качестве двигателей пневмоцилиндры с передачами, желательнее этот механизм устанавливать на основании; тогда первой выбирается вращательная степень подвижности. Однако когда вертикальный ход достаточно большой, а для вращения используется компактный поворотный пневмодвигатель, первой выбирается поступательная степень подвижности по оси  $z$ .

Промышленные роботы, выполняемые по таким схемам, обычно являются вспомогательными, они широко используются для обслуживания кузнечно-прессового оборудования, когда требуется высокое быстрое действие, но может быть невысокая точность. Наличие вращательной пары часто приводит к увеличенным ошибкам по боковым перемещениям, особенно при вытянутой руке. Схема нетипична для технологического оборудования в значительной мере вследствие трудности получения высокой жесткости.

Одна из немногих возможностей ужесточения путем устранения консолей показана на рис. 2.14в. Одним из недостатков выдвигной руки считается необходимость свободного пространства «за спиной» ПР (на случай втягивания руки) аналогично, как это было у ПР, работающих в прямоугольной системе координат (схема вида  $1Px\ 2Py\ 3Pz$ ). Схема вида  $1Py\ 2Vy\ 3Pz$  (с качающейся выдвигной рукой) типична для подвесных вспомогательных ПР (рис. 2.15а); поступательное перемещение по оси  $y$  при этом обычно является межпозиционным. Промышленные роботы с такой схемой приспособлены для обслуживания станков (например, токарных), у которых доступ в рабочую зону сверху. По сравнению с аналогичными ПР, работающими в прямоугольной системе координат, конструкция с качающейся рукой получается легче. Схема того же вида иногда используется в конструкциях манипуляторов встроенных ПР, устанавливаемых на станинах станков (рис. 2.15б). В таких случаях достаточно малых ходов по оси  $y$ . Иногда для этой цели используют напольные ПР со схемой вида  $1Vy\ 2Py\ 3Pz$  (их следует крепить к вертикальной плоскости).

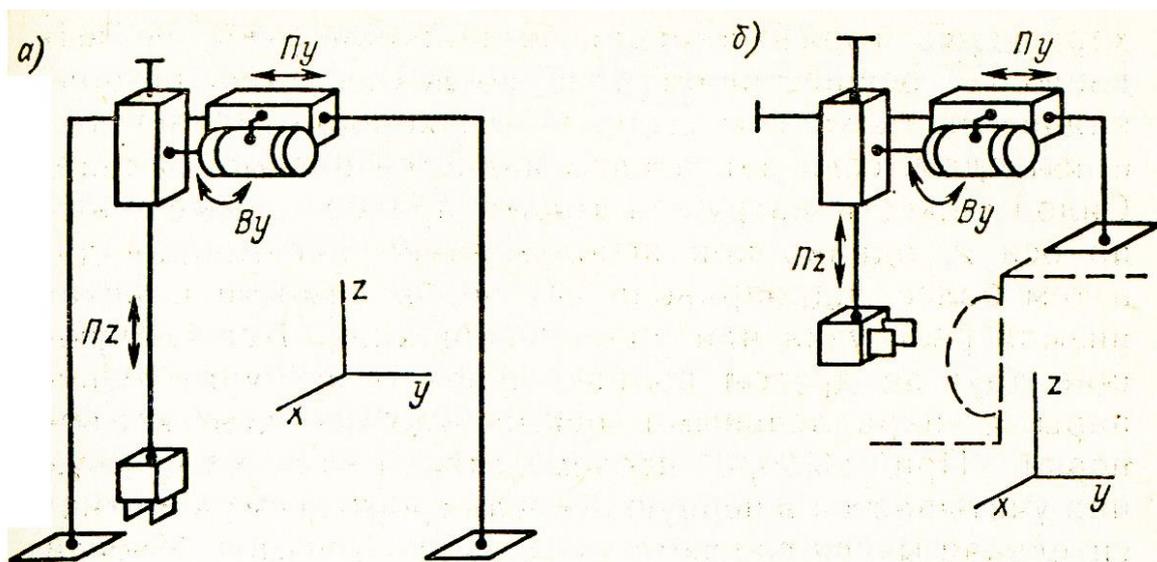


Рис. 2.15.

Из схем с одной поступательной и двумя вращательными кинематическими парами наиболее распространенной является схема вида  $1Bz\ 9Vy\ 3Px$  (рис. 2.16). По этой схеме выполняются напольные ПР как вспомогательные, так и технологические (чаще всего предназначенные для точечной сварки).

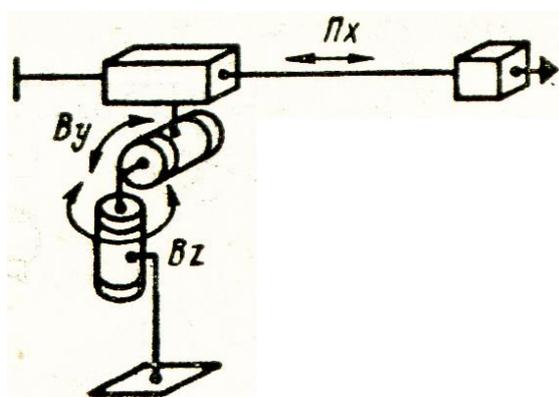


Рис. 2.16.

В манипуляторах с такой схемой (с качающейся и поворачивающейся выдвигной рукой) реализуется сферическая система координат. Схема часто встречается в технике, но не в станкостроении, а, например, в приборостроении. В ПР с такой схемой используется как пневмопривод, так и электропривод. Обычно допускается угол поворота вокруг вертикальной оси  $240^\circ$  или близкий к  $360^\circ$ , а диапазон изменения угла качания, как правило, невелик ( $-30 \dots +30^\circ$ ).

По сравнению со схемой вида  $1Bz\ 2Pz\ 3Px$  данная схема позволяет получать конструкции меньшей массы и с большими вертикальными перемещениями (при вытянутой руке). Важной особенностью является изменение ориентации рабочего органа как при повороте, так и при качании. Это обстоятельство несущественно, если в каждой точке позиционирования нужно задавать свою ориентацию рабочего органа (как при точечной сварке таких объектов сложных форм, как автомобильные кузова), при этом все равно необходимы две ориентирующие степени подвижности.

Если же при переносе нужно сохранять горизонтальную плоскость (что само собой получалось для большинства предыдущих схем),

ориентирующая степень подвижности должна вводиться специально, только для компенсации изменений угла качания. В более сложных условиях работают два привода: выдвижения руки и качания. На них воздействуют сила тяжести и ее момент. Точное уравнивание для этих степеней подвижности практически невозможно. Механизм качания уравнивается для некоторого среднего положения чаще всего путем перераспределения масс.

Обычно ПР со схемой рассматриваемого вида устанавливаются на полу, однако когда несколько однотипных ПР должны выполнять операции одновременно (например, сваривая корпуса в различных точках), то некоторые из них иногда устанавливаются на элементах специальных конструкций, по бокам и сверху. Точность ПР с такой схемой обычно невысока. В последние годы значительное число манипуляторов строится по схеме вида  $1Bz\ 2Bz\ 3Pz$  (рис. 2.17а), в которой оси всех трех пар параллельны. Эта схема имеет много общего со схемой вида  $1Bz\ 2Px\ 3Pz$  с той разницей, что рука является не выдвижной, а складной. Достоинства схемы проявляются, когда при переносе объекта нужно сохранять неизменным вертикальное положение его оси. Промышленные роботы с манипуляторами, выполненными по такой схеме, выпускаются сборочными; благодаря специальным конструктивным решениям конструкция может быть сделана достаточно жесткой, высокая точность обеспечивается за счет высокоточных датчиков следящих электрических приводов. Очень близкой по возможностям является схема вида  $1Pz\ 2Bz\ 3Bz$ , в которой поступательная кинематическая пара является первой (рис. 2.17б). Однако если наиболее ответственным является вертикальное движение (например, при сборке вала и втулки с вертикальной осью), то желательно, чтобы при вертикальном движении подвижная масса была возможно меньше. Так получается в схеме на рис. 2.17а.

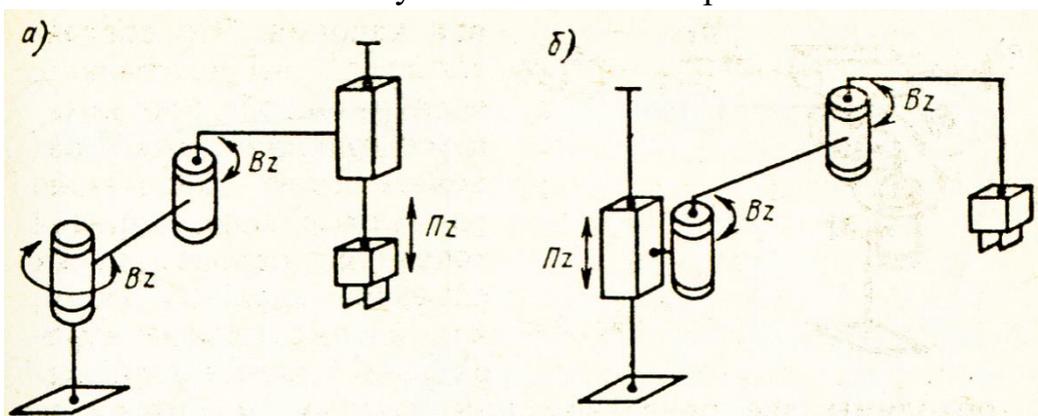


Рис. 2.17.

Промышленные роботы, у которых схемы манипуляторов имеют все три вращательные кинематические пары, иногда называют антропоморфными (имеется в виду аналогия с человеческой рукой, у которой

суставы представляют собой шарниры). Наиболее распространенной является схема вида  $1Bz\ 2By\ 3By$  (рис. 2.18а,б).

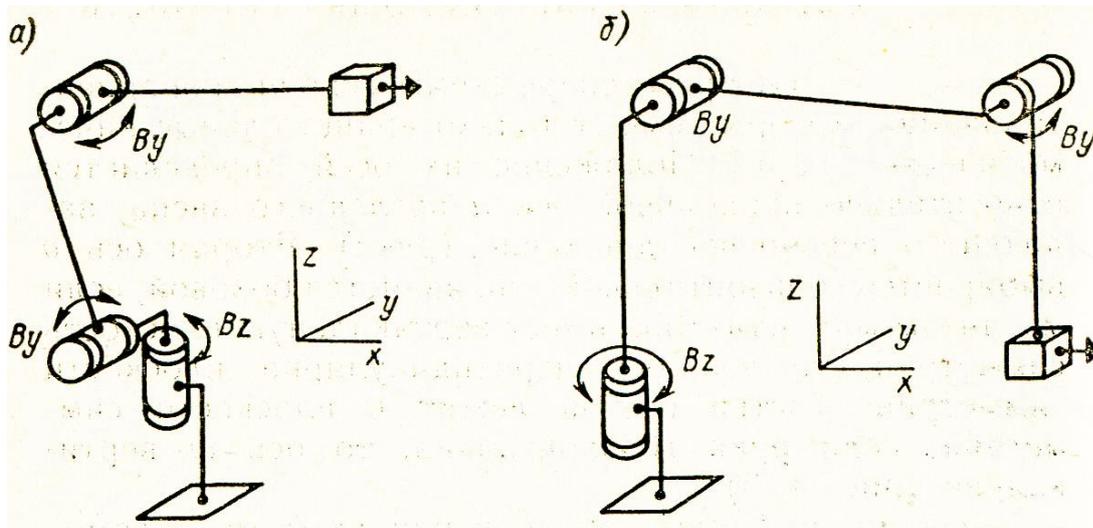


Рис. 2.18.

Система координат, в которой работает манипулятор с такой схемой, часто называется *угловой* или *ангулярной*. До последних лет такая схема использовалась чаще всего в технологических ПР, предназначенных для окраски и сварки, но в последние годы с подобными манипуляторами выпускается много моделей вспомогательных ПР. В приводах чаще всего используются вращательные электродвигатели с редукторами. Часто по всем степеням подвижности приводы одинаковы, что удобно при обслуживании и ремонте.

Промышленные роботы с такой схемой бывают напольными и подвесными; общий облик существенно зависит от выбора длин звеньев и типовых рабочих конфигураций. Вариант схемы на рис. 2.18а, когда положение последнего звена близко к горизонтальному, схож со схемой с выдвигной рукой, именно он чаще используется в универсальных ПР.

Вариант схемы с горизонтальным средним звеном (рис. 2.18б) типичен для окрасочных ПР. Схема позволяет получать самые легкие конструкции манипуляторов, но точность таких ПР невелика. Сложность геометрических соотношений для ангулярной системы координат обычно не имеет значения, так как для технологических ПР такого типа программирование осуществляется обучением. Как и для манипуляторов с качающейся выдвигной рукой, не сохраняется ориентация рабочего органа.

Приводы степеней подвижности находятся в различных условиях. Двигатель поворота вокруг вертикальной оси (как и во многих других схемах, он является первым) не нагружен силами тяжести, по двум другим степеням подвижности целесообразна разгрузка, обычно она

выполняется с помощью пружин.

О степени распространенности различных схем можно судить по каталогам. Две схемы: вида  $1Pz\ 2Vz\ 3Px$  и вида  $1Vz\ 2Pz\ 3Px$  (обе соответствуют цилиндрической системе координат) дают около 75 % выпускаемых промышленных роботов. Если к этим схемам добавить еще четыре (  $1Py\ 2Px\ 3Px, 1Py\ 2Vy\ 3Px, 1Vz\ 2Vy\ 3Px, 1Vz\ 2Vy\ 3Vy$  ) то все вместе они составят около 95 %.

## 2.5. Схемы ориентирующих устройств

Рассмотрим теперь схемы механизмов ориентирования, которые имеют только вращательные, кинематические пары. Положение их осей определяется относительно продольной оси  $u$  последнего звена, задающего переносное движение (руки). Вторая ось выбирается горизонтальной, она является боковой; если механизм манипулятора имеет вертикальную плоскость симметрии, то эта ось перпендикулярна плоскости симметрии. Третья ось  $w$  лежит в плоскости симметрии; если рука горизонтальна, то ось вертикальна (рис. 2.19).

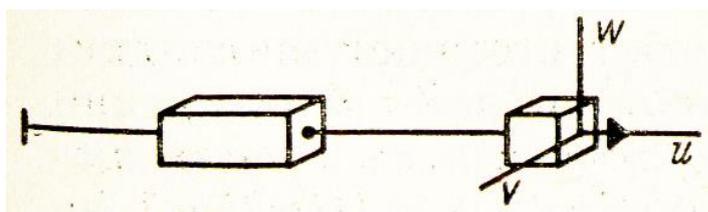


Рис. 2.19.

Буквенно-цифровые обозначения схем механизмов ориентирования аналогичны ранее введенным обозначениям схем переносных степеней подвижности: последовательно, начиная от

руки, для очередной кинематической Пары выписывается ее номер, обозначение ее вида (всегда В) и обозначение оси ( $u$ ,  $v$  или  $w$ ).

При сравнении схем учитываются некоторые из обстоятельств, в частности, "привычность" схемы, простота программирования часто встречающихся движений, технологичность изготовления и сборки узлов, возможности замены консолей двухопорными элементами, массогабаритные характеристики, возможность простого и удобного объединения в одном узле двух или трех ориентирующих или вместе ориентирующих и переносных степеней подвижности. Кроме этого надо учесть следующие обстоятельства.

**Приспособленность к простейшим задачам переориентирования.** Так часто вспомогательные ПР должны кантовать объект, переворачивая его на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси. Нередко требуется поворот объекта на  $90^\circ$  вокруг оси.

**Согласованность с переносными степенями подвижности манипулятора.** Желательно, чтобы вращением по одной или двум ориентирующим степеням подвижности можно было обеспечить неизменность ориентации переносимого объекта, т. е. компенсировать повороты,

возникающие при переносе.

**Естественные ограничения на углы поворота.** Лишь некоторые типовые конструкции допускают большие (до  $180^\circ$ ) или неограниченные углы поворота.

**Ограничения на габариты механизма ориентирования.** Поскольку механизм ориентирования обычно компоуется вблизи рабочего органа (в частности, схвата), то ограниченность рабочей зоны может налагать жесткие ограничения на габариты механизма ориентирования. Габариты существенно зависят от положения осей кинематических пар, обычно габариты больше по осям пар.

**Удобство размещения элементов несущей конструкции и привода.** В этом отношении преимущества имеют схемы, в которых первая ось вращения направлена по продольной оси руки (совпадает с осью  $u$ ).

С учетом этих обстоятельств рассмотрим основные схемы. Сначала с одной, затем с двумя и с тремя степенями подвижности. Схема вида  $1B_u$ , в которой вращение осуществляется вокруг продольной оси руки, является одной из наиболее распространенных схем (рис. 2.20). В описаниях вращение вокруг продольной оси руки часто называется *ротацией*. Ротация часто используется в манипуляторах ПР, работающих в цилиндрической системе координат. Она допускает переворачивание объекта вокруг горизонтальной оси  $u$  на  $180^\circ$ , что нередко требуется от ПР, обслуживающих прессы, которые выполняют операции штамповки, вырубки и гибки.

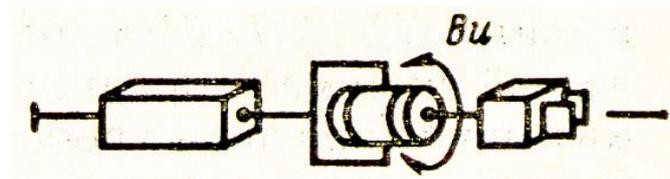


Рис. 2.20.

является консольным. Вал, подшипники и двигатель удобно компоуются вдоль по руке, они могут размещаться внутри руки. Ротация не приспособлена для компенсации вращений при переносе. Это часто и не нужно

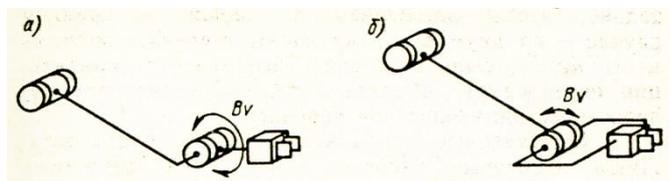


Рис. 2.21.

при расстановке обслуживаемого оборудования по окружности. Это часто и не нужно при расстановке обслуживаемого оборудования по окружности. Это часто и не нужно при расстановке обслуживаемого оборудования по окружности.

Схема вида  $1B_v$ , в которой имеет место качение вокруг боковой оси  $v$  (рис. 2.21), хорошо согласуется с манипулятором, имеющим качающуюся руку. В этом случае поворотом вокруг оси  $v$  объект может приводиться в горизонтальную плоскость, для этого угол поворота вокруг этой оси задается равным углу наклона руки, но с обратным знаком. По сравнению со схемой вида  $1B_u$ , габариты данной схемы по оси  $v$  больше, имеются определенные трудности с раз-

Если достаточно переворачивания заготовки на  $180^\circ$ , то требуемые крайние положения вращающейся части обычно задаются упорами.

Механизм вращения является консольным. Вал, подшипники и двигатель удобно компоуются вдоль по руке, они могут размещаться внутри руки. Ротация не приспособлена для компенсации вращений при переносе. Это часто и не нужно при расстановке обслуживаемого оборудования по окружности.

Схема вида  $1B_v$ , в которой имеет место качение вокруг боковой оси  $v$  (рис. 2.21), хорошо согласуется с манипулятором, имеющим качающуюся руку. В этом случае поворотом вокруг оси  $v$  объект может приводиться в горизонтальную плоскость, для этого угол поворота вокруг этой оси задается равным углу наклона руки, но с обратным знаком. По сравнению со схемой вида  $1B_u$ , габариты данной схемы по оси  $v$  больше, имеются определенные трудности с раз-

мещением двигателя. Если механизм является консольным (рис. 2.21а), то угол поворота конструктивно не ограничивается, но для получения высокой жесткости приходится специально усиливать конструкцию. Большую жесткость можно получить для варианта схемы с вилкой (рис. 2.21б), но при этом конструктивно ограничивается угол поворота (примерно в пределах  $\pm 90^\circ$ ).

Схема вида  $1Bw$  приспособлена для манипуляторов с горизонтальной выдвижной рукой. Ориентирующие устройства с такой схемой приспособлены для работы с плоскими заготовками, когда их нужно как угодно поворачивать в горизонтальной плоскости, но не нужно переворачивать вокруг горизонтальной оси. При этом часто рабочим органом является вакуумное захватное устройство.

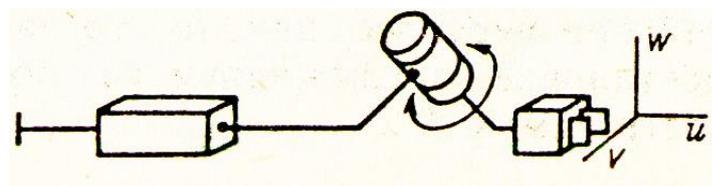


Рис. 2.22.

не совпадающей ни с одной из осей  $u$ , или  $w$  (рис. 2.22). Но они являются узко специализированными, и применяются редко.

По поводу всех ориентирующих механизмов с одной степенью подвижности следует сказать, что они типичны для вспомогательных ПР и почти никогда не используются в технологических ПР. Рассмотрим теперь схемы с двумя кинематическими парами, оси которых взаимно перпендикулярны.

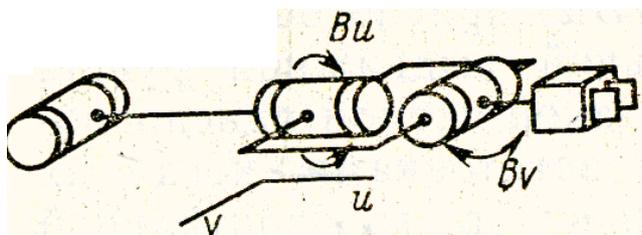


Рис. 2.23.

Схеме вида  $1Bu 2Bv$  (рис. 2.23) обычно соответствуют более простые конструкции, но для нее несколько усложняется программирование. Схема вида  $1Bv 2Bu$  (рис. 2.24а) хорошо согласуется с манипулятором с качающейся

рукой. Вращением вокруг оси  $v$  рабочий орган приводится в горизонтальную плоскость (при этом ось  $z$  становится вертикальной), а далее второй степенью подвижности объект поворачивается в горизонтальной плоскости, как у манипулятора с горизонтальной рукой. Схемы вида  $1Bv 2Bw$  (рис. 2.24б) и вида  $1Bw 2Bv$  (рис. 2.24в) практически равноценны по возможностям задания движений и по особенностям реализующих их устройств; они преимущественно используются в манипуляторах технологических ПР, в частности, предназначенных для нанесения покрытий или окраски. В этих случаях вращением вокруг осей  $v$  и  $w$  удобнее всего отклонять ось рабочего органа вверх-вниз и вправо-влево, когда рука горизонтальна, и направлена в сторону объекта.

Три ориентирующие степени подвижности используются в манипуляторах, когда необходимо задавать любую произвольную ориентацию в пространстве рабочего органа.

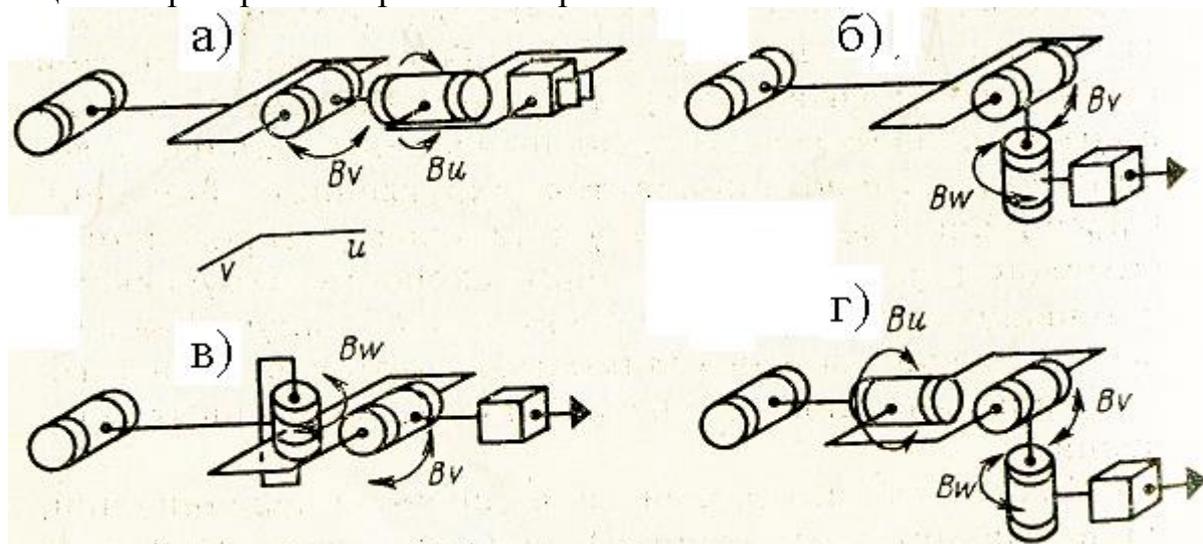


Рис. 2.24.

Три ориентирующие степени чаще всего встречаются в манипуляторах технологических ПР, для которых требуется определенным образом задавать не только положение основной оси рабочего органа, но и всего его в целом. Так, для точечной сварки важно подвести сварочные клещи так, чтобы электроды перемещались перпендикулярно свариваемым листам и, кроме того, механизм клещей помещался в свободной зоне.

Взаимное расположение осей кинематических пар выбирается таким, чтобы в исходном положении механизма все три оси были взаимно перпендикулярными. Конструктивные различия механизмов в значительной мере определяются положением продольной оси  $u$ . Чаще всего встречается схема вида  $1B_u 2B_v 3B_w$  (рис. 2.24г).

## 2.6. Дополнительные степени подвижности

Дополнительные, "лишние" степени подвижности вводятся в схему манипулятора для расширения возможностей. Рассмотрим основные способы усложнения кинематических схем. Одним из наиболее эффективных способов является установка на манипуляторе нескольких рук. При этом кинематическая цепь манипулятора оказывается разветвленной. Разветвление может происходить на разных уровнях. Крайним является случай, когда ПР имеет два кинематически не связанных манипулятора, установленных на одном общем основании. Несмотря на то, что манипулятора два, машина в целом представляет собой один ПР, поскольку оба они управляются одним устройством управления и база их обоих – единая.

Необходимость построения таких ПР возникает тогда, когда при вы-

полняемых операциях совершенно необходимо манипулировать двумя руками. Так, при сборке один манипулятор может удерживать одну собираемую деталь, а другой – перемещать вторую. Но они могут также работать параллельно, устанавливая разные детали на одну базовую. Возможно также разделение функций при сборке: один манипулятор подает детали, и снимает собранный узел, а другой осуществляет саму сборку.

Для других технологических ПР возможно такое разделение функций: один манипулятор удерживает и, возможно, перемещает и поворачивает объект, а другой – перемещает рабочий орган (горелку при сварке или резке, распылитель при нанесении покрытий или окраске). Вместо одного из манипуляторов может быть устройство типа сдвижного или поворотного стола, на который устанавливается объект. При таком построении технологического ПР совершенно стирается грань между роботом и станком (или обычной технологической установкой). Специфика в том, что манипулятор сохраняет большое число степеней подвижности.

На вспомогательных операциях типа переноса и установки – целесообразность использования ПР с двумя манипуляторами может иметь место тогда, когда объект длинномерный, и его невозможно переносить, захватывая только в одном месте. Однако в подобных случаях считается предпочтительным устанавливать два совершенно независимых ПР (их можно ставить как удобно, на любом расстоянии). Другой вариант схемы с независимыми манипуляторами изображен на рис. 1.18а.

Промышленный робот является порталным, по одному ригелю перемещаются две тележки. Таким образом, для двух независимых манипуляторов общей является направляющая межпозиционного перемещения. Промышленные роботы с такими схемами являются вспомогательными, как и обычные порталные ПР, они приспособлены для обслуживания оборудования (станков), установленного в ряд. Два манипулятора нужны тогда, когда единиц обслуживаемого оборудования достаточно много, всегда или часто заготовки нужно передавать на соседнюю позицию (на соседний станок или в ближайший накопитель) и когда один манипулятор не справляется с нагрузкой. Более распространенной является схема порталного ПР, несколько рук которого установлено на одной тележке (см. рис. 1.18б).

Если рук две, то чаще всего они используются так: одна рука несет с транспортера на станок заготовку, подлежащую обработке, а другая – вынимает обработанную заготовку из патрона станка, после чего первая рука устанавливает необработанную заготовку в освободившийся патрон. Вследствие того что очередная заготовка уже поднесена, сокращается время простоя технологического оборудования.

При большем числе рук (их бывает до шести) без возвращения к транспортеру обслуживается сначала один станок, а потом другие. Подобный порталный ПР частично выполняет функции транспортного ПР. Каждая из рук имеет обычно две переносные степени подвижности и ино-

гда одну ориентирующую. Ориентирующая степень подвижности используется тогда, когда нужно переустанавливать заготовку после переворачивания ее на  $180^\circ$ .

Напольные вспомогательные ПР с двумя руками достаточно широко распространены. Обычно это ПР с пневмоприводом, работающие в цилиндрической системе координат и предназначенные для обслуживания прессов. Обе руки имеют общие механизмы подъема и поворота, самостоятельными являются только механизмы выдвигания и ориентирования.

Иногда руки устанавливаются неизменно параллельно друг другу на одном уровне (рис. 2.25а), но чаще предусматривается их разворот в горизонтальной плоскости на произвольный угол с последующим за-

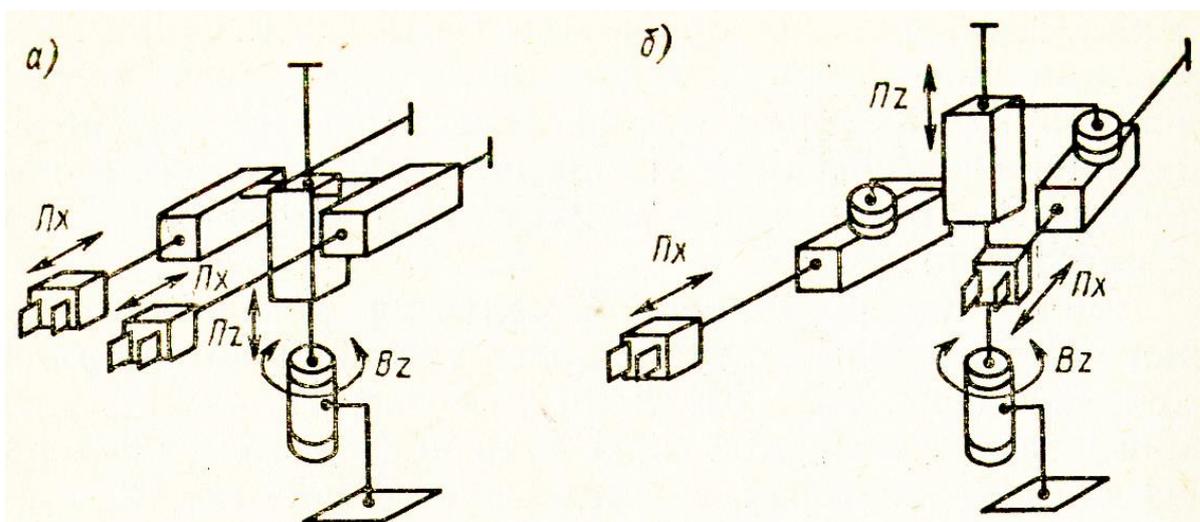


Рис. 2.25.

креплением, при этом они располагаются на разных уровнях (одна несколько выше другой – рис. 2.25б).

ПР, работающие в цилиндрической системе координат, приспособлены для обслуживания оборудования, расставленного по окружности вокруг робота. Двухрукый ПР позволяет сокращать время обслуживания, если обслуживаемых единиц оборудования несколько.

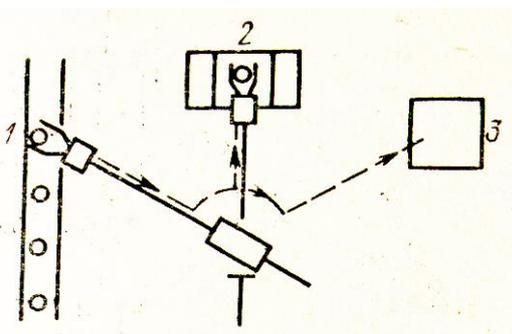
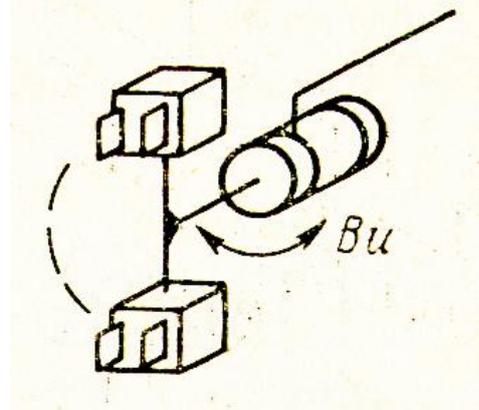


Рис. 2.26.

Расстановка оборудования схематично изображена на рис. 2.26. В положении, показанном сплошными линиями, ПР одной рукой захватывает заготовку на позиции 1 с транспортера, а второй рукой вводит заготовку в рабочую зону на позиции 2 и после выполнения рабочей операции вытаскивает ее. В положении, показанном штриховыми линиями, первая рука устанавливает заготовку на позицию 2, а вторая – на позицию 3.

Совмещение во времени установки и взятия заготовок на разных по-

зациях позволяет сокращать время простоя оборудования. Если ПР обслуживает большое число единиц оборудования, то имеет смысл увеличивать число рук. Известны ПР с тремя руками. Разветвление кинематической цепи ПР может происходить в самом конце. На рис. 2.27 изображена схема руки с двумя схватами. Механизм ориентирования меняет местами схваты,



первый из них, захвативший заготовку из патрона, отводится в сторону, а на его месте оказывается второй схват с заготовкой, подлежащей обработке. Таким образом, быстрая замена обработанной заготовки необработанной осуществляется более экономными средствами, чем установкой отдельных рук. Введение дополнительных, "лишних" степеней подвижности имеет смысл и тогда, когда кинематическая цепь остается нераз-

ветвленной, т. е. звенья соединяются после

Рис. 2. 27. довательню друг за другом. Рассмотрим типовые задачи, которые решаются путем введения дополнительных степеней подвижности.

1. Необходимо увеличить ход по одной из степеней подвижности, когда он конструктивно ограничен типом или имеющейся номенклатурой двигателей. Например, может быть существенным ограничение на ход пневмоцилиндра. В этих случаях является естественным введение однотипного привода с параллельной осью кинематической пары. Степени свободы, которые дают перемещения по той же оси, могут быть смежными, соседними (рис. 2.28а) или разделенными другими кинематическими парами (рис 2.28б).

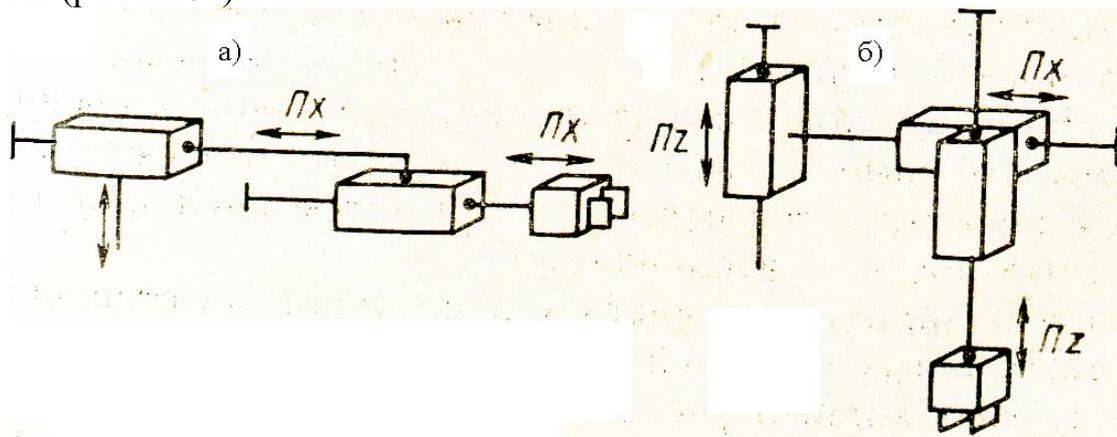


Рис. 2.28.

2. При перемещениях по каждой из степени подвижности (от упора до упора) требуется получить больше двух точек позиционирования. Последовательное включение двух приводов, для каждого из которых имеется только две точки позиционирования, дает возможность получить четыре

точки (получаются при четырех возможных комбинациях двух перемещений вперед-назад). При увеличении числа последовательно включенных приводов число точек быстро растёт.

3. Необходимо сделать так, чтобы при перемещении по одной степени подвижности могло осуществляться прямолинейное движение по любой заданной прямой. Введение в схему двух вращательных кинематических пар перед поступательной (рис. 2.29) позволяет получить это свойство. При этом две ориентирующие степени подвижности идут перед последней переносной.

4. Необходимо провести согласование схемы ПР с осями оборудования, расставленного не в точном соответствии со схемой идеальной расстановки. Для ПР, работающего в цилиндрической системе координат, желательно, чтобы при расстановке оборудования по окружности оси, по которым рука ПР вводится в рабочие зоны, были радиальными. В действительности их направления могут отличаться от радиальных (рис 2.30), при этом введение дополнительной степени подвижности (ее можно рассматривать как межпозиционную с малым ходом или переносную) позволяет исправить положение. Это дает возможность перемещать объекты по осям оборудования

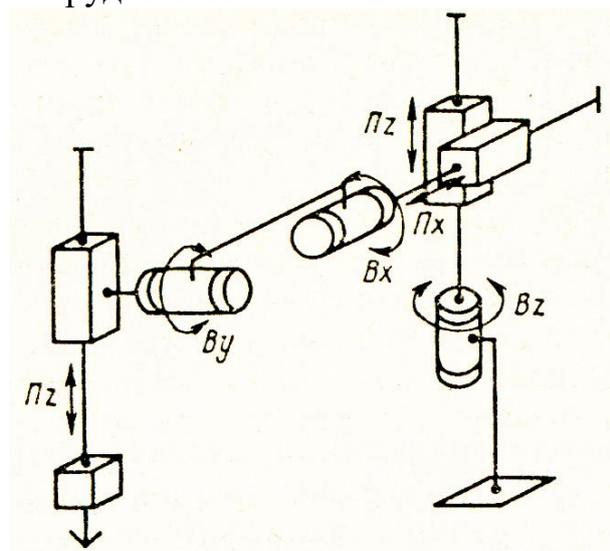


Рис. 2.29.

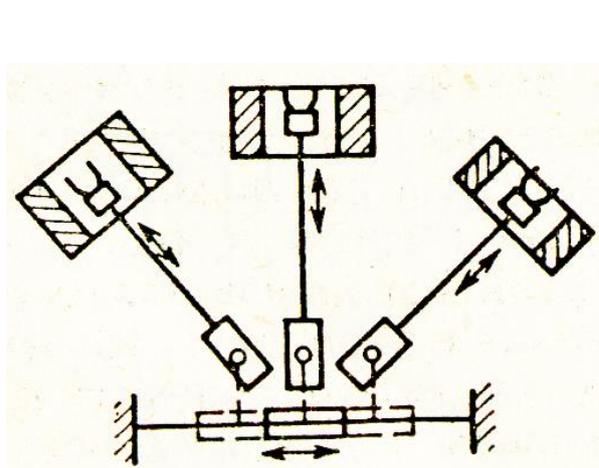


Рис. 2.30.

5. Конструкция манипулятора должна быть складной, чтобы при большом максимальном вылете манипулятор помещался в узкой зоне. Это достигается введением большого числа вращательных кинематических пар (рис. 2.31).

6. Манипулятор должен обеспечивать подход к предмету с различных сторон (например, при нанесении покрытий и окраске). Большая гибкость при этом достигается введением дополнительных вращательных пар.

7. Точные заключительные движения (например, при сборке) желательно выполнять при малых перемещающихся массах. В этих слу-

чаях обычно вводят дополнительные степени подвижности с малыми ходами. Оси этих перемещений могут совпадать по направлению с осями переносных степеней подвижности.

Часто встречаются случаи, когда при переналадке желательно значительно изменять конфигурацию (например, увеличивать или уменьшать вылет), но во время работы дополнительные степени подвижности не нужны. В этих случаях для расширения возможностей манипуляторов предусматриваются установочные смещения. Так, например, цилиндр выдвижной руки может закрепляться в разных положениях, основание манипулятора может устанавливаться на разной высоте. Переустановка может осуществляться или вручную, или с помощью специальных приводов.

## **2.7. Модульные промышленные роботы**

В последние годы все большее распространение получают модульные промышленные роботы. Общая логика и конкретные пути построения модульных ПР вытекают из общих принципов модульного построения любого оборудования. Поэтому начнем именно с этих общих принципов.

### **2.7.1. Принципы модульного построения оборудования**

Модуль обычно определяется как унифицированный или нормализованный узел, который характеризуется структурной, функциональной и конструктивной самостоятельностью и который может стыковаться с другими узлами (модулями) того же комплекта.

Функциональная самостоятельность модуля означает, что он сам выполняет какую-либо задачу, например, задает движение по одной степени подвижности или служит опорой для других модулей. Конструктивная самостоятельность модуля означает, что он может быть изготовлен и (или) собран отдельно и затем собран с другими модулями. Распространено такое простое объяснение: модули – это кубики, из которых можно собирать различные конструкции. Соединение модулей дает агрегат. В государственном стандарте (ГОСТ 23887-79) агрегат определяется как сборочная единица, обладающая полной взаимозаменяемостью, возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно. Определение агрегата имеет много общего с определением модуля.

Для нас важно, что агрегат представляет собой более крупную единицу, чем составляющие его модули. Агрегативно-модульная система может быть многоуровневой. Это означает, что агрегаты (не самые крупные) можно рассматривать как модули более высокого уровня, более крупные кубики, из которых можно собирать еще более крупные единицы, агрегаты более высокого уровня.

По отношению к агрегату на любом уровне его составные части сле-

дует рассматривать как модули. Таким образом, получается такая единая система (рис. 2.31). Изделие в целом находится на высшем уровне, оно представляет собой агрегат первого уровня. Его составные части по отношению к нему являются модулями первого уровня; они же представляют собой агрегаты второго уровня по отношению к своим составным частям, модулям второго уровня. Это продолжается далее, до тех пор, пока на низшем уровне не окажутся простые элементы. Число уровней зависит от сложности изделий. Иногда число уровней достигает семи.

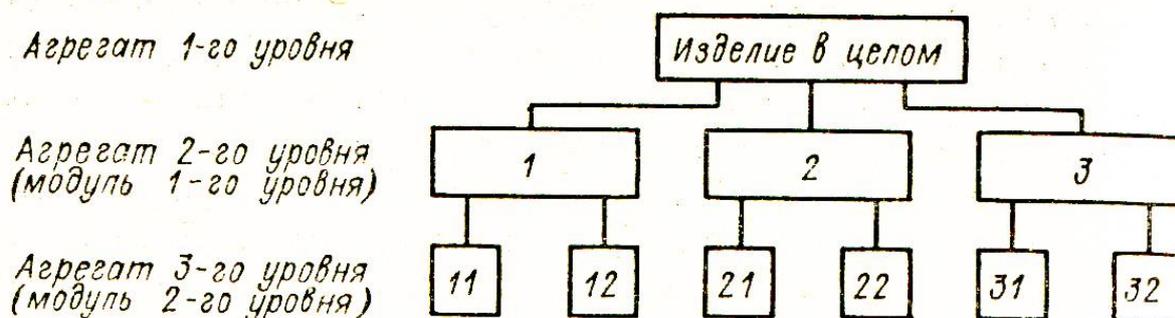


Рис. 2.31.

В некоторых случаях модулям или агрегатам различных уровней присваиваются самостоятельные названия: после изделия в целом следует модуль-агрегат, затем модуль-узел и модуль-деталь. Однако такая терминология не является общепринятой. Для проектировщиков и для ремонтников важны все уровни, соединение модулей на всех уровнях в соответствии с требованиями взаимозаменяемости должно происходить без подгонки и тем более без изготовления дополнительных элементов. Для технологов важны преимущественно два верхних уровня: изделие в целом, и его крупные составные части – модули первого уровня, поскольку возможности получения различных модификаций изделия проявляются именно на этих уровнях. Поэтому в дальнейшем, когда речь идет о модулях, то имеются в виду модули первого уровня.

Модульное оборудование проектируется, и выпускается комплектами или наборами. Различным соединением разных или одинаковых модулей получают модификации оборудования. Конечно, не все сочетания модулей имеют смысл, и вообще возможны. Число возможных модификаций и практически полезных модификаций модульного оборудования является важным показателем: чем больше модификаций, тем больше приспособляемость оборудования к различным условиям. В зависимости от класса изделий и числа модулей число модификаций может меняться от трех-четырех до многих десятков или даже сотен. Отметим некоторые важные преимущества модульного оборудования.

1. Повышается серийность выпуска по сравнению со случаем, когда вместо модификаций выпускаются самостоятельные изделия. Это проявляется сильнее, если возможных модификаций много: вместо сотен типов самостоятельных изделий нужно выпускать немногие десятки типо-

размеров модулей.

2. Нет необходимости тщательно изучать структуру спроса на конкретные модели оборудования в связи с изменениями условий производства. Если какие-либо модификации окажутся ненужными, их просто перестанут собирать, а из тех же модулей будут собирать другие, пользующиеся спросом. Могут оказаться ненужными только некоторые модули, а не изделия в целом.

3. Возникают широкие возможности специализации отдельных предприятий по производству различных модулей с последующим кооперированием этих предприятий. Более мелкие предприятия не могут выпускать изделия в целом, но им по силам отдельные модули, которые потом будут собирать в комплекты.

4. Сокращаются сроки разработки новых моделей вследствие того, что достаточно создавать лишь некоторые новые модули, а большинство модулей можно оставлять прежними.

5. Создаются возможности сокращения времени разработки и наладки производственных систем. Если немодульное оборудование не очень подходит к конкретному месту работы, его нужно переделать или доделать, на что уходит время. Если же имеется модульный комплект, из него прямо на месте можно подбирать модификации, которые окажутся наиболее подходящими, и на это потребуется меньше времени.

6. Значительно повышается приспособленность оборудования к гибкому производству, поскольку при изменении расстановки оборудования, изменении номенклатуры производимых изделий и пр. будет достаточно не заменять единицы оборудования целиком, а лишь подобрать другую, более подходящую модификацию.

7. Упрощается обслуживание, поскольку обслуживающий персонал должен изучить устройство и приспособиться к эксплуатации немногих модулей, а небольшого числа различных моделей оборудования.

8. Повышается надежность работы оборудования, поскольку относительно небольшое число унифицированных модулей может быть лучше отработано конструктивно и технологически, что всегда существенно повышает надежность.

9. Облегчается ремонт оборудования, и сокращаются сроки ремонтных работ. Основным видом ремонтных работ становится замена отказавших модулей новыми или восстановленными. Ремонт самого модуля, если он необходим, производится, когда он вынут из изделия, а изделие в это время работает с исправным модулем. Так как число типоразмеров модулей мало, то при эксплуатации на одном предприятии большого числа модификаций оборудования из одного и того же набора достаточно иметь относительно небольшой запас резервных модулей.

Модульное оборудование имеет и недостатки.

1. Конструкция оборудования усложняется вследствие неизбежного

введения лишних узлов соединений, разъемов и т.п.

2. При выборе параметров модулей приходится закладывать излишние запасы по жесткости, прочности, мощности двигателей и т.п., чтобы могли нормально работать самые громоздкие модификации. При этом другие модификации, с меньшим числом модулей, будут недогружены.

Модульное оборудование следует сравнивать или с совокупностью различных моделей оборудования, собранных вместе, или со сложным оборудованием, дающим те же возможности, что и все модификации. Часто и при одном и при другом сравнении отмечаются преимущества модульного оборудования.

### 2.7.2. Виды модулей и способы построения модификаций

При проектировании модульных ПР сначала важно иметь полное представление о том, какими могут быть модули. На рис. 2.32 представлена классификация модулей по различным классификационным признакам. Названия классификационных признаков вписаны в овальные рамки. Соединительные модули (иногда их называют соединительными элементами) предназначены для соединения других модулей с фундаментом, со станинами обслуживаемого оборудования (встроенные ПР), со специальными несущими кон-

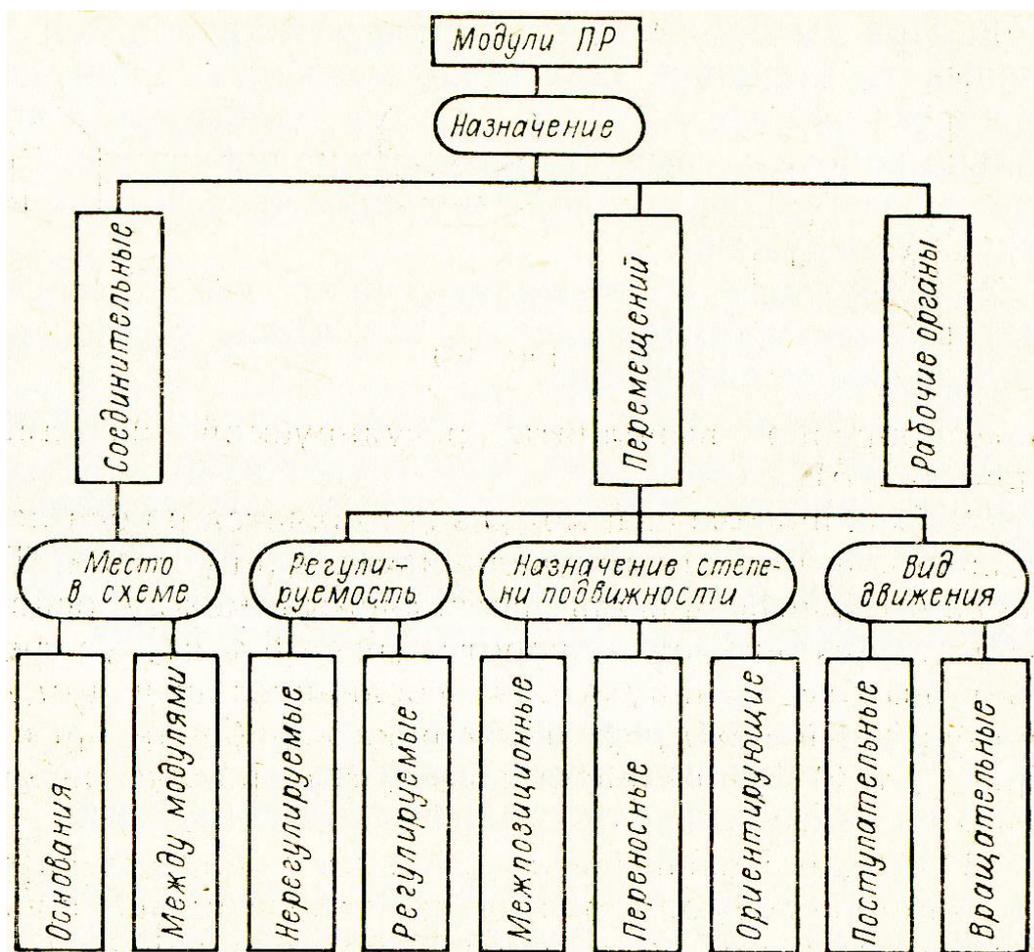


Рис. 2.32.

струкциями или друг с другом. Нерегулируемые соединительные модули имеют заданные конфигурацию и размеры, регулируемые имеют составные части, которые можно закреплять в различных положениях.

**Модули перемещений** в модульном наборе **являются основными**, обычно каждый из них имеет один двигатель и задает движение по одной степени подвижности, но бывают модули на несколько степеней подвижности. Модули перемещений **классифицируются по виду степеней подвижности** (*межпозиционные, переносные и ориентирующие*) **и по виду задаваемого движения** (*поступательное и вращательное*). Модули рабочих органов выделяются в самостоятельную группу.

Рассмотрим сначала подробнее, для чего могут служить и какие бывают соединительные модули. Модули оснований могут предусматривать неподвижную установку ПР на фундамент, на стену, на перегородку, на стол, подвижную – на тележку или шасси и т. п. Соединительные модули, которые вставляются между другими модулями, могут выполнять разные функции. Типичными являются следующие случаи.

1. Соединительный модуль заменяет модуль перемещения, когда в процессе манипулирования можно не задавать перемещения по соответствующей степени подвижности. Так, например, соединительный модуль постоянной длины может заменить выдвижную руку манипулятора робота-перекладчика, когда ось поворота подвижной части может быть установлена на одинаковом расстоянии от точек захватывания и установки объекта, а препятствия по линии переноса (окружности) отсутствуют (рис. 2.33а).

Для лучшей приспособляемости к различному расположению оборудования руку целесообразно выполнять регулируемой по длине (рис. 2.33б).

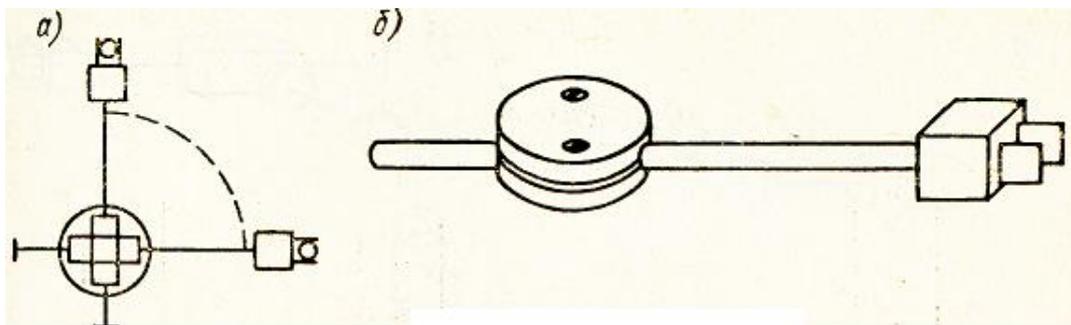


Рис. 2.33.

2. Соединительный модуль вставляется по оси перемещения и тем самым увеличивает длину звена. Так, соединительный модуль, вставляемый между основанием и механизмом поворота (рис. 2.34а), увеличивает высоту манипулятора, соединительный модуль, вставляемый между фланцем руки и рабочим органом (рис. 2.34б), увеличивает вылет, т. е. ради-

ус рабочей зоны.

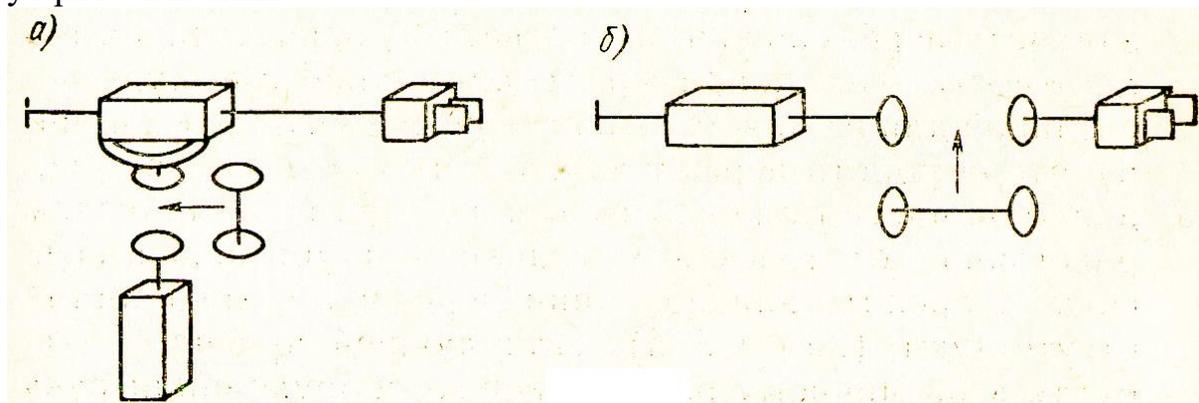


Рис. 2.34.

3. Соединительный модуль задает боковое смещение (сдвиг) последующего модуля относительно предыдущего. Так, можно смещать рабочий орган на более высокий уровень (рис. 2.35а) или задавать боковое смещение руки относительно оси поворотной колонны (рис. 2.35б).

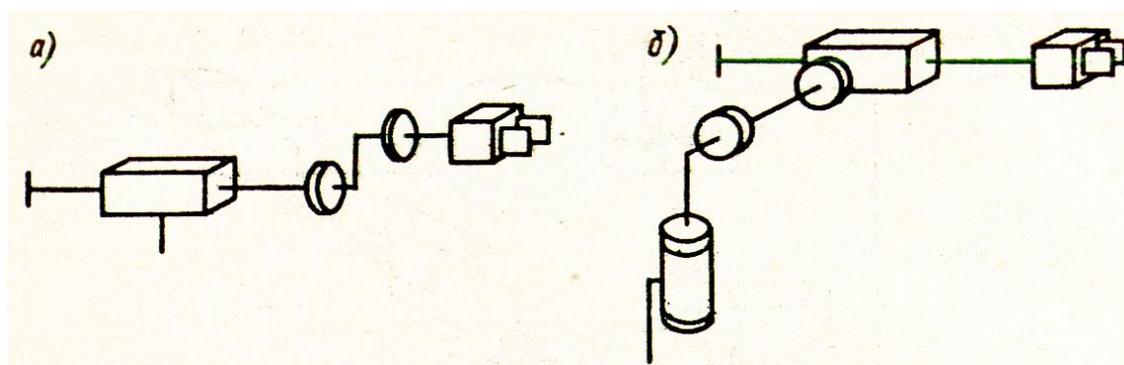


Рис. 2.35.

4. Соединительный модуль имеет вид угольника. Он служит для поворота последующего модуля относительно предыдущего на определенный или произвольно устанавливаемый угол. Так, при установке такого модуля между фланцем руки и схватом (рис. 2.36б) изменяется ориентация осей схвата. Если в исходной модификации схват надвигался на захватываемый объект движением вперед (рис. 2.36а), то во второй модификации удобно схват опускать сверху (рис. 2.36б).

5. **Соединительные модули** выполняют функции переходных элементов при объединении двух разных комплектов. Модули разных комплектов обычно имеют различные типы соединений или различные размеры соединительных поверхностей.

6. Соединительные модули вставляются между ними и избавляют от необходимости изготавливать по месту эксплуатации специальные узлы соединений. Регулируемые соединительные модули позволяют изменять длины, смещения или углы, но не во время работы ПР, а при его переналадке.

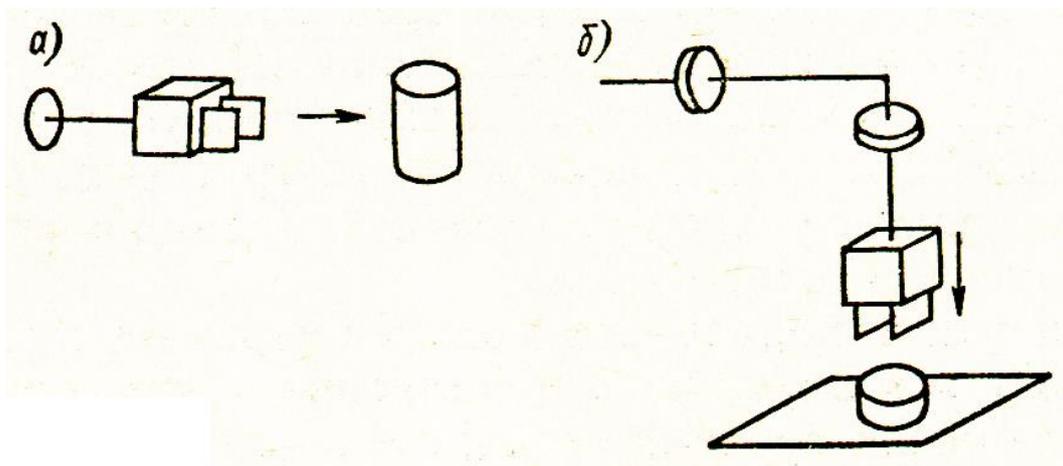


Рис. 2.36.

*Модули перемещений, реализующие межпозиционные и переносные степени подвижности*, обычно имеют по одной степени подвижности, а *модули перемещений, реализующие ориентирующие степени подвижности*, обычно объединяют все их, так что ориентирующий модуль задает повороты на один, два или три угла.

Обзор и анализ разработанных к настоящему времени и проектируемых модульных ПР позволяет выделить ряд приемов, которые иногда используются независимо, а иногда в сочетаниях.

1. Разрабатывается одна разборная базовая модификация ПР, она обладает наибольшим числом степеней подвижности, поэтому ее возможности по манипулированию объектами наиболее широкие. Все остальные модификации получаются изъятием одного или нескольких модулей в различных сочетаниях. Оставшиеся модули соединяются, при этом возможна перестановка их.

Получающиеся модификации имеют меньшее число степеней подвижности и меньшие возможности манипулирования, но при изъятии "лишних" модулей повышается жесткость конструкции манипулятора, снижается масса, сокращается время цикла. Так, если не требуется переориентирование объекта, целесообразно изъять модуль ориентирования; за счет этого повышается грузоподъемность.

2. Число типоразмеров модулей в комплекте уменьшается до минимума. Например, если не требуется переориентирование, в комплект включаются только все одинаковые модули линейных перемещений, все модификации получаются их соединением с различной ориентацией и последовательностью осей. В результате получают модификации ПР, работающего в прямоугольной системе координат (рис. 2.37).

Конструкция получается наиболее удобной, если в модулях используются одинаковые электродвигатели с винтовыми передачами. Число получаемых модификаций можно увеличить, если на каждом модуле предусмотреть несколько посадочных мест (узлов соединений).

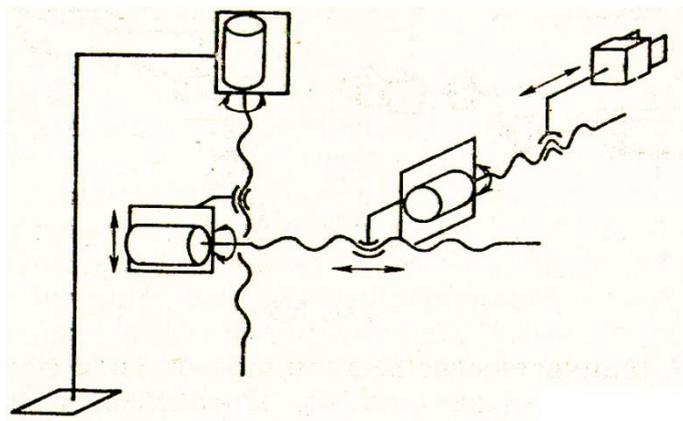


Рис. 2.37.

Если же необходимо задавать вращения, то следует предусмотреть еще один или два типоразмера вращательных модулей. Один – для переносных степеней подвижности, другой – для ориентирующих степеней.

3. Число типоразмеров модулей перемещений также выбирается малым, но в до-

полнение к ним придается большое число простых соединительных модулей, которые позволяют в широких пределах менять высоту и вылет, устанавливая вместо одной две руки, разворачивать как нужно рабочие органы и пр. Этот прием хорош тем, что большое число модификаций получается простыми и дешевыми средствами.

4. Число типоразмеров модулей перемещений выбирается большим. Имеются, например, модули выдвижной руки, одинаковые по схеме и сходные по конструкции, но различающиеся ходами, модули подъема также с разными ходами, модули ориентирования с разным числом степеней подвижности и с различным расположением осей и т.д. Преимуществом такого способа построения набора является то, что каждая модификация экономна по ходам, габаритам и массам (модули выбираются с небольшими запасами), но большое число модулей в комплекте может сводить на нет преимущества модульного построения.

5. В комплект входят отдельно как узлы приводов с двигателями, так и сменные средние части звеньев. Вставляя различной длины эти средние части, даже при одной и той же кинематической схеме можно получать модификации, сильно различающиеся по размерам и ходам. Этот способ является наиболее подходящим, когда все переносные степени подвижности – вращательные. Заметим, что при этом при изменении длин звеньев может существенно изменяться и грузоподъемность: грузоподъемность снижается при увеличении длин звеньев. Применимость различных приемов зависит от назначения ПР и грузоподъемности. Для сверхлегких и легких ПР важна возможность установки и закрепления манипуляторов в различных положениях и на различных основаниях. Поэтому для них имеет смысл предусматривать наборы различных оснований.

Вообще для сверхлегких и легких ПР могут быть использованы все приемы, поскольку сборка и разборка модификаций на модули при их массе, не превышающей 50 кг, трудностей не представляет, она может выполняться вручную.

Для средних ПР обычно предусматриваются два варианта установки: напольная и подвесная. Поскольку для монтажа и демонтажа таких

ПР нужны средства механизации, а соединение и разъединение модулей требует больших затрат времени, то для них стараются уменьшить число соединений, модули перемещений обычно соединяются непосредственно, без специальных соединительных модулей. В настоящее время большинство модульных наборов (обычно их называют просто модульными ПР) имеет небольшое число (5...10) модулей, из них не более двух модулей оснований, остальные – модули перемещений (модули рабочих органов не считаются).

Если из наборов можно собирать большое число различных модификаций, нужно уметь наглядно представлять способы их формирования. Существует несколько способов такого представления. Первый способ, условно-графический, основан на построении схемы возможных соединений модулей в виде ветвящегося дерева. Кружки изображают модули; прямые линии, соединяющие кружки, изображают реальные соединения модулей.

Для всех модулей вводятся цифровые или буквенные сокращенные обозначения. Дерево строится снизу вверх, движение от одной вершины к следующей означает присоединение очередного модуля. Числа-кружков в одной ветви от основания до конца равно числу модулей в модификации. Около каждого кружка записывается цифровое или буквенное обозначение модуля и, если нужно, способ соединения (когда очередной модуль может быть присоединен к предыдущему несколькими способами).

Пример построения схемы-дерева изображен на рис. 2.38. Здесь О означает неподвижное основание, В – модуль вращения, П – модуль подъема, Р – модуль выдвижной руки, У – модуль ориентирования, 31 и 32 – варианты модулей захватных устройств.

Если модулей оснований несколько, то по их числу изображается несколько деревьев. Способ изображения позволяет показать на одном листе способ построения нескольких десятков модификаций, но он недостаточно нагляден.

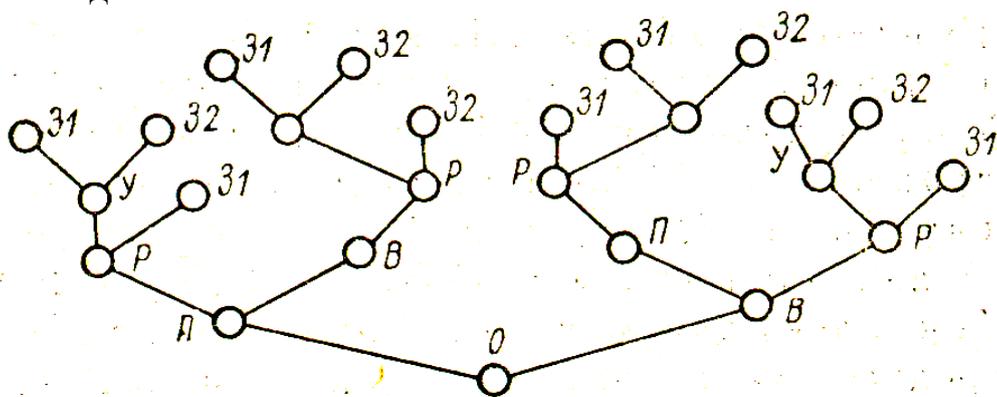


Рис. 2.38.

Второй способ изображает разложение модификаций по модулям. Используются упрощенные, но вполне наглядные изображения модулей и собранных из них модификаций. Составляется таблица изображений. В первом столбце, в начале каждой строчки изображается модификация в сборке, а далее – в остальных столбцах либо отмечается знаком плюс наличие соответствующего модуля в модификации, либо повторяется упрощенное изображение этого модуля. Таким образом, в строчке получается как бы разборка модификации на модули. Такой способ является удобным и подходящим, если модулей немного и каждая пара модулей может соединяться только одним способом.

Пример представления множества модификаций вторым способом представлен на рис. 2.39.

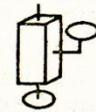
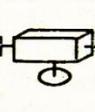
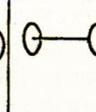
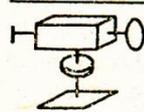
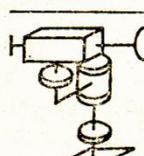
Модификация	М о д у л ь				
	1	2	3	4	5
					
	+	-	-	+	-
	+	-	+	+	-

Рис. 2.39.

При третьем способе используется два столбца изображений: в левом даются изображения модулей, а в правом – модификации. Соединительными линиями – прямыми – указывается, из каких модулей собирается та или иная модификация.

Такой способ удобен, когда модификаций немного (рис. 2.40).

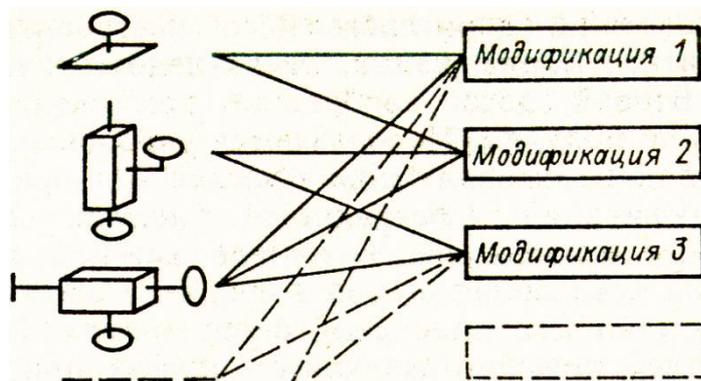


Рис. 2.40.

Если имеется одна базовая модификация, в которую входят все модули, а остальные модификации получаются изъятием одного или двух модулей, то базовая модификация изображается в центре, а по радиусам от нее даются другие модификации.

Агрегатно-модульный принцип построения в таком виде, как он был описан, применяется преимущественно для механических устройств, а именно, для манипуляторов. Устройства управления тоже можно было бы строить по такому принципу. Однако предпочитают делать иначе. Устройство управления делают единым, унифицированным, с тем чтобы без всяких изменений, только за счет внутренней коммутации, можно

было приспособлять его к любой модификации манипулятора. Но при замене одной модификации манипулятора другой, конечно, приходится помимо сборки механических узлов также соединять силовые и сигнальные кабели и трубопроводы. При этом некоторые элементы приводов (например, клапаны и распределители – для пневмоприводов) могут или располагаться на модулях манипулятора или быть конструктивно связанными с единым устройством управления.

Само устройство управления может быть блочно-модульным, однако его модули при этом не соотносятся с модулями манипулятора. Наборы модулей формируются так, чтобы модификации имели одинаковую или близкую грузоподъемность. Перспективно объединять несколько наборов, чтобы каждый из них был рассчитан на разную грузоподъемность, но чтобы они все вместе имели по возможности больше унифицированных или одинаковых по конструкции элементов. Такие модульные наборы пока только разрабатываются. Считается, что грузоподъемности для наборов имеет смысл выбирать их различающимися в четыре-пять раз.

### 2.7.3. Примеры модульных роботов

Наборы модулей часто называются просто модульными ПР. Технологические ПР модульной конструкции встречаются редко, у них обычно предусматриваются сменные модули оснований с тем, чтобы их можно было устанавливать или на пол, или на специальные несущие металлоконструкции, а также иногда различные модули ориентирования. Операции обслуживания являются гораздо более разнообразными по геометрическим требованиям и ограничениям, поэтому гораздо большее распространение получили вспомогательные ПР модульной конструкции. Рассмотрим два типичных примера модульных ПР.

*Сверхлегкие промышленные роботы* ПР5-2П-13.3.7 и ПР5-2Э-13.3.7 разработаны в РФ и предназначены для обслуживания автоматических линий приборостроительных предприятий. Их технические характеристики: привод пневматический, три степени подвижности, номинальная грузоподъемность (по массе объекта) – 0,32 кг, максимальная абсолютная погрешность позиционирования – 0,1 мм, максимальные скорости перемещений: линейные – 0,2 м/с, угловые – 180°/с, время цикла – 3...6 с, необходимое давление воздуха в магистрали – 0,4 мПа, масса манипулятора – до 17 кг.

Буквенные индексы П и Э в обозначении ПР относятся к двум разным устройствам управления; первое представляет собой командоаппарат, а второе – перепрограммируемый микроконтроллер МКП-1. Комплект модулей состоит из пяти видов модулей перемещений (каждый из них имеет несколько типоразмеров) и четырех соединительных модулей (соединительных элементов). Модули изображены на рис. 2.41.

Модуль линейного перемещения МЛ-5 представляет собой по-

движное основание, он имеет шесть типоразмеров с ходами 50...200 мм, двигателем является пневмоцилиндр.

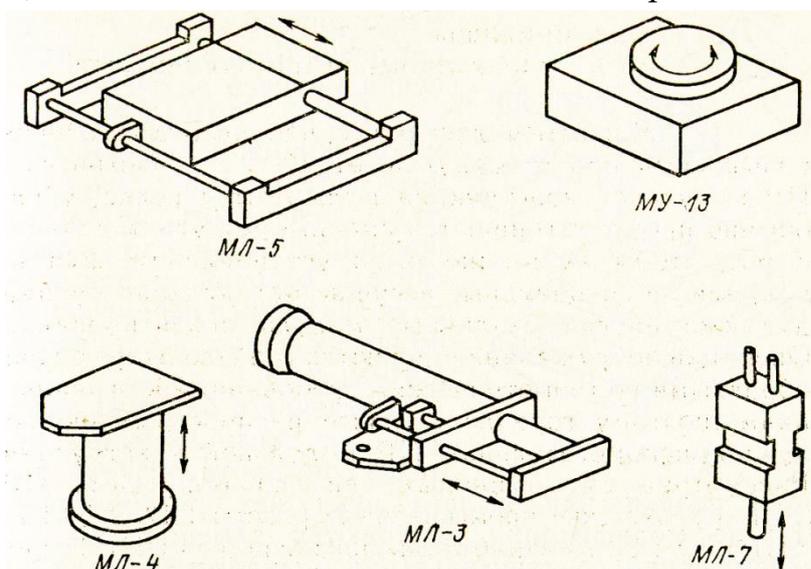


Рис. 2.41.

Модуль вращения (угловой модуль) МУ-13, предназначенный для вращения вокруг вертикальной оси, может одновременно выполнять функцию основания, но может устанавливаться на линейный модуль МЛ-5.

Модуль линейного перемещения МЛ-4 представляет собой механизм вертикального подъема, он имеет два типоразмера с ходами 30 и 50 мм. Модуль линейного перемещения МЛ-3 выдвигной руки имеет четыре типоразмера с ходами 15...150 мм.

Модуль линейного перемещения МЛ-7 с малым ходом (20 мм), если необходимо, устанавливается на конце руки, он реализует дополнительную – досылочную степень подвижности. Он может быть установлен в двух положениях – с горизонтальной и с вертикальной осями перемещения.

Модули ориентирующих степеней подвижности в комплекте отсутствуют, но имеются четыре соединительных модуля.

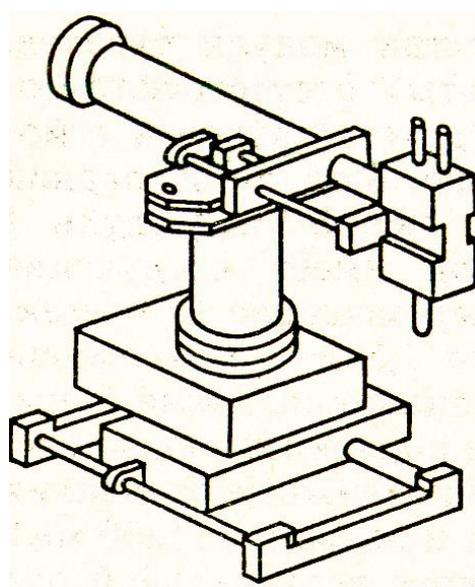


Рис. 2.42.

Соединительный модуль А представляет собой руку постоянной, но регулируемой при настройке длины. Он заменяет модуль МЛ-3 выдвигной руки. Соединительный модуль Б заменяет модуль МЛ-4 вертикального подъема, высота также регулируется при настройке; этот модуль играет роль неподвижного основания. Соединительный модуль В также заменяет модуль МЛ-4, но он предназначен для соединения с модулем вращения МУ-13, с которым модуль Б не стыкуется. Соединительный модуль Г предназначен для соединения модулей МЛ-5 и МЛ-4. Таким образом, всего насчитывается девять видов моду-

лей, причем некоторые из них имеют по несколько типоразмеров. Всего разработчиками предусмотрено 16 вариантов соединения модулей различных видов. На рис. 2.42 изображена модификация, в которой имеются все модули перемещений. Эту модификацию с пятью степенями подвижности можно считать базовой, в ней имеются все модули перемещений, но нет ни одного соединительного модуля. Введение в базовую модификацию соединительных модулей с целью увеличения высоты стойки или вылета руки не предусмотрено. Другие модификации получаются заменой модулей перемещений соединительными модулями сначала по одному, затем по два, или по три, в некоторых случаях возможно просто изъятие модулей перемещений без замены их соединительными.

Во всех модификациях последовательность соединения модулей одна и та же, модули нельзя менять местами. Неизменными также являются способы соединения модулей и, следовательно, относительные положения осей перемещений (исключение представляет лишь модуль МЛ-7, ось которого может быть вертикальной или горизонтальной). Модули рабочих органов в комплекте отсутствуют; предполагается, что захватные устройства должны проектировать и изготавливать по месту эксплуатации, по данным о форме и размерах переносимых деталей.

**Средний промышленный робот** РПМ-25 предназначается для обслуживания кузнечно-прессового, металлорежущего и литейного технологического оборудования. Во всех модификациях робот имеет одну выдвижную руку. Технические характеристики, общие для всех модификаций, следующие: привод электромеханический, шесть – семь степеней подвижности, номинальная грузоподъемность (по массе объекта) – 25 кг. Модификации делятся на две группы: напольные на основании и с межпозиционными перемещениями (по рельсовому пути или по порталу). В комплект входят четыре модуля оснований (подвижных и неподвижных), восемь модулей переносных и ориентирующих перемещений и три модуля схватов. Соединительные модули (элементы) отсутствуют, модули перемещений соединяются друг с другом и с модулями оснований непосредственно. Модули оснований и перемещений изображены на рис. 2.43.

Модуль 1 портала с подвижной тележкой имеет следующие характеристики: максимальное перемещение 10 м, максимальная скорость перемещения 1,5 м/с, максимальная абсолютная погрешность позиционирования 2 мм. Модуль 2 представляет собой неподвижное основание. Модули 3 и 4 представляют собой подвижные основания соответственно с малым (500 мм) и большим (1200 мм) ходами.

Модуль 5 вращения вокруг вертикальной оси (поворота) имеет следующие характеристики: диапазон изменения угла  $300^\circ$ , угловая скорость  $135^\circ/\text{с}$ , максимальная угловая погрешность  $0,06^\circ$ . Имеются два модуля поворота вокруг горизонтальных осей: модуль 6 простого качания (диапазон изменения угла  $60^\circ$ ) и модуль 7 двойного качания (диапазон

90°). Модуль 8 вертикального перемещения имеет ход 0,4 м, скорость – 0,4 м/с, погрешность позиционирования – 0,4 мм. Модуль 9 выдвигной руки имеет ход 1,0 м, скорость – 0,6 м/с, погрешность – 0,8 мм.

Модули ориентирующих степеней подвижности имеются в трех вариантах (10, 11 и 12), они задают вращение соответственно по одному углу (вокруг продольной оси руки), по двум и по трем углам с угловыми скоростями 180°/с. Во всех трех модулях механизмы ориентирования вынесены вперед по длине руки, вследствие этого максимальный радиус рабочей зоны получается большим – 1,75 м.

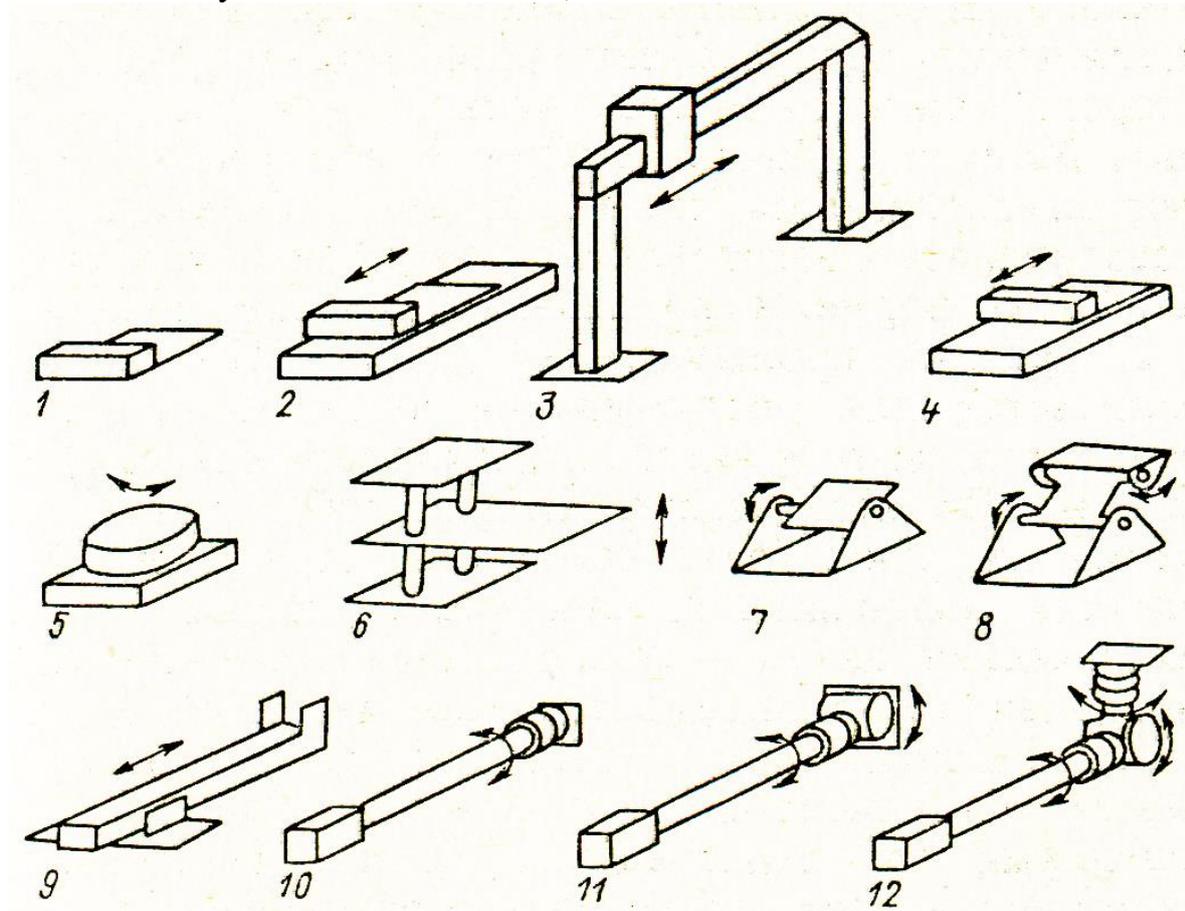


Рис. 2.43.

В комплект входят три модуля хватных устройств: модуль простого схвата, модуль двойного схвата (для захватывания длинномерных объектов), модуль простого схвата с механизмом сдвига, задающим малые боковые смещения.

Состав комплекта модулей в том виде, как был описан выше, впоследствии, после выпуска первых серий, неоднократно пополнялся и изменялся. Из модулей можно компоновать манипуляторы не более чем с одной степенью подвижности, с несколькими (от одной до четырех) переносными степенями подвижности.

При различных сочетаниях модулей переносных степеней подвижности могут быть получены манипуляторы с различными кинематиче-

скими схемами. Так, если на модуль 4 с поперечной осью перемещения установить модуль 8 вертикального перемещения, а затем модуль 9 выдвигной руки с одним из модулей 10, 11 или 12, то получится манипулятор, работающий в прямоугольной системе координат. При установке на модуль 2 неподвижного основания модуля 5 вращения, а затем последовательно модулей 8, 9 и 10 получается манипулятор, работающий в цилиндрической системе координат. Для сферической и угловой (ангулярной) систем координат последовательность модулей должна быть соответственно 2, 5, 6, 9 и 10 или 2, 5, 7, 9 и 10. Введение дополнительных степеней подвижности может существенно расширять возможности манипулятора. Так, установкой модуля 3 с осью по направлению оси руки можно получить большие перемещения рабочего органа (порядка 2 м).

Возможность соединения различных модулей обеспечивается унификацией типов соединений и присоединительных размеров, разъемов кабелей и трубопроводов. Унифицированным является также электропривод: используются только два типа электродвигателей мощностью 1 и 2 кВт. Робот выпускается с двумя вариантами устройства позиционного управления: аналоговым и дискретным; они различаются по точности. Указанные выше данные по погрешностям относятся к аналоговому управлению, дискретное управление является более точным.

### **3. Управление движениями (УД): от человека – к роботу**

#### **3.1. Рука человека и работа**

Средства робототехники в ряде применений должны действовать в органическом единстве с человеком. Поэтому требуется знать, как организованы и управляются движения человека и робота.

Во внешней среде человек совершает два вида движений – *манипуляции* и *локомоции*. Манипуляция (от французского слова *manus*–рука) – это движение рук при выполнении какой-либо работы.

Локомоция (от латинских слов *locus*– место и *motio*– движение) – движение всего тела для осуществления перемещения во внешней среде. Человек выполняет его с помощью ног, но иногда использует и руки (ползание, лазанье, плавание).

Основу промышленного робота, его скелет, образует система механических устройств. Чаще всего это один или несколько манипуляторов роботов с подвижным основанием, что используется для расширения рабочей зоны. По своей структуре манипулятор аналогичен руке человека. Он состоит из механических плеча и предплечья (вместе они часто называются механической рукой робота), захватывающего устройства (кисти) и сменных обрабатывающих инструментов.

Вся работа, которую делает робот, выполняется исключительно с помощью манипулятора. По сравнению с рукой человека (рис. 3.1) рука

робота может совершать более точные перемещения с большим грузом, однако уступает руке человека в совершенстве и разнообразии выполняемых движений. К числу несомненных преимуществ механической руки следует отнести то, что она без усталости и с исключительной точностью может бесчисленное количество раз совершать одни и те же операции, управлять окружающим оборудованием и производить высококачественные изделия. Выполняя порученную работу, рука робота не знает промахов и неудач. Имеется целый ряд других достоинств механической руки по сравнению с человеческой.

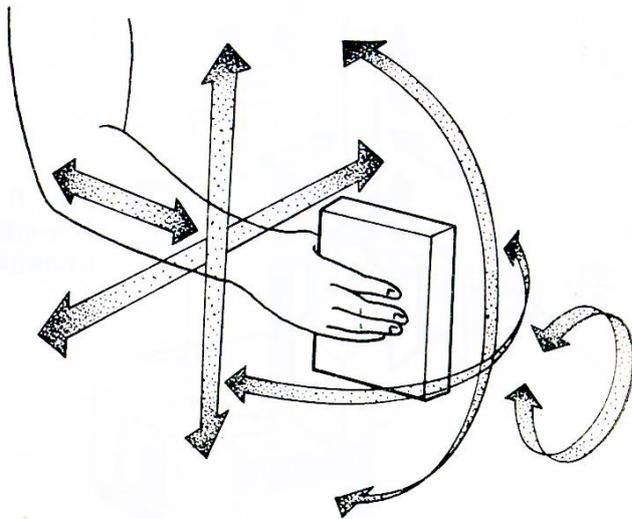


Рис. 3.1. Шесть степеней подвижности руки человека

Чтобы управляться с трехмерными деталями в пространстве, рука робота, также как и рука человека, должна иметь 6 степеней подвижности: 3 степени подвижности требуются для осуществления переноса детали в заданное положение, а еще 3 – для установки детали в нужной ориентации. Захват предметов механической рукой чаще всего выполняется с помощью двух пальцев, поэтому требуется еще 1 степень подвижности, характеризующая

положение пальцев схвата робота.

Чем больше степеней подвижности имеет рука робота, тем сложнее она устроена, следовательно, тем выше стоимость манипулятора, его масса и параметры. Но, чем больше степеней подвижности, тем большее количество операций сможет выполнять один и тот же робот и тем легче адаптировать его к изменениям внешней среды.

**Количество степеней подвижности выбирается с учетом практических потребностей.** Например, чтобы взять с горизонтальной подставки предмет, показанный на рис. 3.2, роботу достаточно всего 4 степеней подвижности (без учета захвата). Здесь 3 степени подвижности необходимы для перемещения схвата к предмету вдоль координатных осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и 1 – для придания схвату требуемой ориентации – поворот вокруг оси  $z$ . Другим более практическим примером может послужить сварочный робот, выполняющий прямолинейные швы методом дуговой сварки. Чтобы, при перемещении по прямой управлять также и углом наклона электрода к поверхности детали, роботу необходимо 5 степеней подвижности (рис. 3.3).

Большинство практически используемых промышленных роботов имеют 4...5 степеней свободы. При необходимости применяются роботы с

6 степенями подвижности.

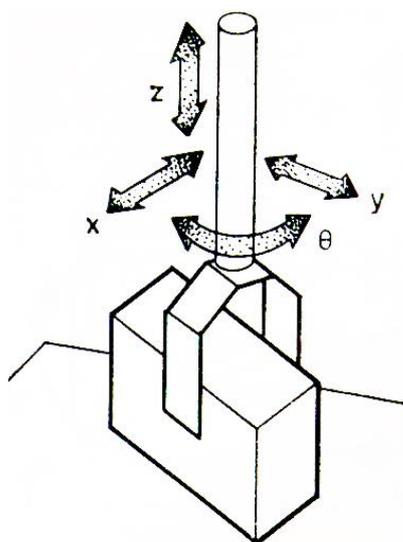


Рис. 3.2. 4 степени подвижности для выполнения простых манипуляций

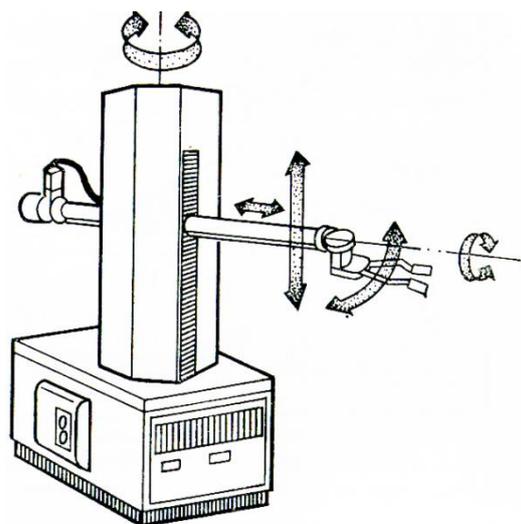


Рис. 3.3. 5 степеней подвижности ПР

Движение манипулятора состоит из перемещений руки (плеча и предплечья) и запястья с кистью. Первое перемещение определяет положение кисти в рабочем пространстве, а второе – её ориентацию. Оба типа перемещений находятся в тесной взаимосвязи между собой. Часто бывает так, что попытки изменить ориентацию кисти манипулятора без изменения ее положения в пространстве не приводят к успеху. Поэтому при переходе к новой ориентации кисти приходится одновременно производить и перемещение руки.

Классификация рук промышленных роботов проводится в соответствии с их конструкцией. На рис. 8.3 показано устройство манипулятора одного из первых в мире роботов, рука которого может совершать перемещения по осям  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ . Система координат с такими осями называется цилиндрической.

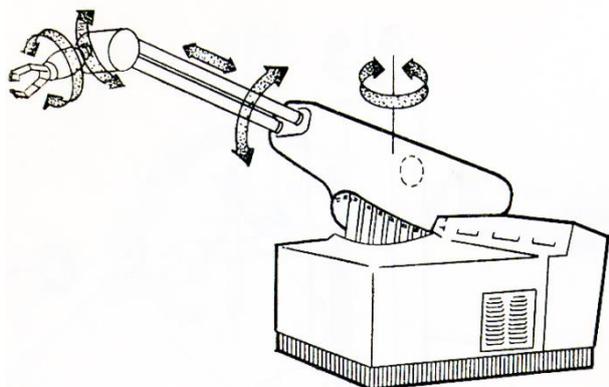


Рис. 3.4. Движения ПР в сферической системе координат

На рис. 3.4 представлена схема основных движений робота работающего в сферической системе координат, т. е. способного перемещаться по осям  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ .

Для выполнения механосборочных операций часто применяются роботы, манипулятор которых работает в прямоугольной системе координат (рис. 3.5.) и предназначен для выполнения высокоточных операций при ме-

ханической обработке. Манипулятор одной из первых моделей роботов с повышенной точностью движений показан на рис. 3.6.

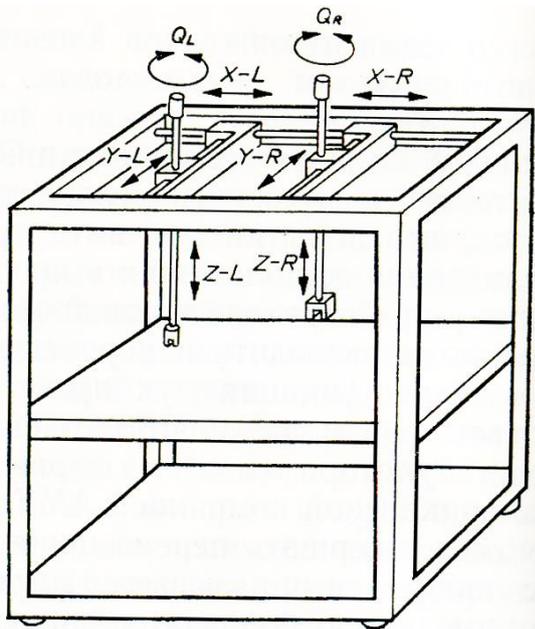


Рис. 3.5. Движения ПР в прямоугольной системе координат

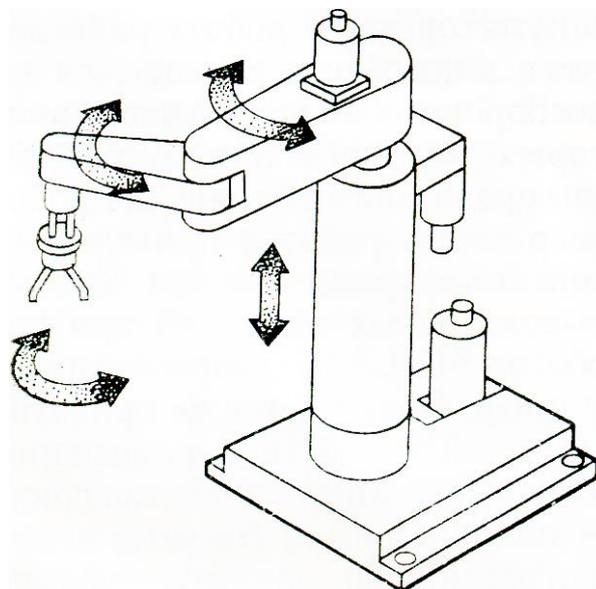


Рис. 3.6. Манипулятор с повышенной точностью движений

В настоящее время появляется все большее количество промышленных роботов с многосвязными манипуляторами, которые приближаются по своей конструкции к руке человека. Эти роботы используются в сложных технологических процессах.

## 3.2. Общая схема УД человека

### 3.2.1. Динамические уровни УД

Система управления движениями тела человека является иерархической. В ней можно выделить 5 уровней управления:

- стратегический уровень (принятие решений о выполнении определенных действий на основе мотиваций);
- тактический уровень;
- три динамических уровня (исполнение движений путем управления мышцами на основе внешней информации; рефлекторного связанного управления несколькими звеньями тела; рефлекторного управления отдельными звеньями).

Два нижних динамических уровня управления – это управление по жестким (врожденным) программам, т. е. это уровни рефлекторного управления. Управление на них осуществляется через спинной мозг, но в нем участвует и головной мозг – нижние отделы мозжечка (обеспечение тонуса мышц и позы) и передний мозг (связанное программное управление).

Контур управления одной мышцей, реализованный в сегменте спинного мозга, которому подчинен сегмент тела, включающий эту мышцу, состоит из 3 частей – слоя мотонейронов, управляющих мышцей, сенсорного слоя, связанного с внутренними рецепторами мышцы и сухожилий, и расположенного между ними слоя, осуществляющего обработку информации и запоминание готовых программ, реакций на определенные воздействия. В простейшем случае эти промежуточные слои могут отсутствовать, и тогда мотонейроны замыкаются прямо на рецепторы. Совокупность двух систем управления мышцами-антагонистами (сгибающей и разгибающей) обеспечивает управление движением отдельного сустава.

*Управление с использованием внешней информации.* Этот третий уровень управления ответствен за выполнение движений с использованием информации от внешних рецепторов. В нем участвуют все отделы головного мозга вплоть до самых молодых. Реализуется он двумя параллельными путями: через второй уровень управления и непосредственным воздействием со стороны коры больших полушарий (ее двигательной зоны) на сегменты спинного мозга.

Первый путь – это древний экстрапирамидный путь управления более сложными движениями, которые постепенно осваивались живыми организмами в процессе эволюции и для реализации которых требовалось привлекать все более сложную сенсорную информацию. На её основе на этом уровне вырабатываются задания для второго уровня, затем они оперативно корректируются в ходе реализации.

Второй, пирамидный путь, возникший всего несколько миллионов лет тому назад, реализует наиболее совершенные и сложные движения, которые не удастся выполнить первым путем на базе ранее освоенных рефлекторных движений.

Третий динамический уровень управления ответствен за ориентацию во внешнем пространстве тела и органов чувств на объекты внешней среды, локомоции и манипуляции, а также за выполнение сложных движений.

Локомоции (ходьба, бег и т. п.), являясь периодическими движениями, реализуются на основе управления мышцами от своих "спинальных генераторов", которые синхронизированы друг с другом на том же сегментарном уровне. Необходимая адаптация к внешним условиям осуществляется, прежде всего, путем корректировки этих программных движений сигналами от внутренних рецепторов. Вышестоящие уровни управления корректируют затем локомоции уже с учетом тех внешних условий движения, которые определяются внешними рецепторами, включая перемещение целей движения.

Манипуляционные движения больше всего зависят от внешних рецепторов и мотиваций. В коре больших полушарий головного мозга имеются области (сенсомоторная кора), за которыми закреплены опре-

деленные сегменты тела, и они осуществляют управление мышцами этих сегментов на основе получаемой внешней и внутренней информации. Все рассмотренные динамические уровни управления движением, действуя совместно, реализуют требуемые движения в виде комбинации следующих 3 составляющих:

- грубые и быстрые рефлекторные (программные) движения без обратной связи и без использования внешней информации (первый и второй уровни);
- такие же стереотипные движения, но корректируемые с помощью внешней информации (экстрапирамидный путь третьего уровня);
- наиболее тонкие и точные движения, выполняемые с учетом текущей внешней информации (пирамидный путь третьего уровня).

Последний вариант управления требует максимального участия головного мозга и используется только в тех случаях, когда требуемое движение не удастся свести к рефлекторным. В случае необходимости он резервирует предыдущие варианты, а также участвует наряду с экстрапирамидным путем в отработке новых программ (формировании новых рефлекторных дуг). Такой процесс обучения можно представить следующим образом. Вначале требуемое новое движение многократно осуществляется путем управления мышцами непосредственно высшими двигательными центрами.

Одновременно запоминаются и усредняются синтезированные при этом управляющие воздействия на отдельные мышцы. В результате формируется готовая двигательная реакция на задание сверху и, соответственно, верхние уровни освобождаются от управления отдельными мышцами, передавая эту функцию нижним уровням. Эти вновь приобретенные в ходе обучения программы хранятся и реализуются третьим уровнем управления.

Описанное трехуровневое управление движениями наряду с такими очевидными достоинствами, как максимальное быстрое действие реакций (отдернуть руку и т. п.), возможность обучения и разгрузка высших уровней для решения более сложных задач, имеет и определенные недостатки. При таком управлении движения зачастую получаются неоптимальными, не использующими всех возможностей двигательной системы организма.

Управление мышцами непосредственно сверху позволяет не только получать лучшее качество движений, но и осуществлять принципиально новые типы сложных движений, не реализуемых с помощью экстрапирамидного пути, на котором этому препятствует набор врожденных и приобретенных стереотипных программных движений. Именно поэтому при освоении новых движений на производстве и в спорте часто главной проблемой становится преодоление ранее сложившихся рефлекторных движений.

### 3.2.2. Tактический уровень УД

На этом уровне составляется план достижения той очередной цели, которая задается вышестоящим стратегическим уровнем управления. Отсюда этот план в виде конкретного алгоритма движений с выделением тактических подцелей и последовательности их достижения спускается для реализации на динамические уровни. Со стороны тактического уровня осуществляются непрерывный контроль и в случае необходимости оперативная корректировка заданных алгоритмов при изменении реальной ситуации. Реализуется этот уровень корой больших полушарий головного мозга (ее ассоциативными областями), т. е. в полной мере он свойствен лишь человеку и только у высших животных существует в зачаточном состоянии.

Tактические подцели, которые намечаются на этом уровне, требуют осмысленных движений, например, движений с предметами. К подобным действиям относятся производственные операции с применением орудий труда (сварка, сборка и т. п.), а также вязание спицами, работа хирурга, письмо. Такими же осмысленными действиями, но без предметов являются, например, речь и массаж.

Tактический уровень – это высший уровень управления для подобных целенаправленных движений, реализующий их путем разбиения на более простые движения, которые затем уже "бездумно" исполняются нижними исполнительными уровнями.

### 3.2.3. Стратегический уровень УД

Это высший уровень всей иерархической системы управления движением. Здесь определяются цели и осуществляется контроль за их реализацией, включая оперативную корректировку этих действий и самих целей в зависимости от эффективности процесса их достижения. После завершения действий здесь же оцениваются достигнутые результаты. Этот уровень и сам непосредственно участвует в реализации наиболее сложных и новых движений.

Выбор целей поведения определяется потребностями, их сравнительной важностью и возможностями их удовлетворения. Потребности проявляются в виде чувств – биологических и социальных; врожденных и приобретенных; инициированных извне или возникших в самом организме (голод, опасность, любопытство и т. д.). Предельно сильным проявлением чувства являются эмоции (гнев, восторг и т. п.). Существующие в данный момент потребности поступают в виде чувств в ассоциативные области коры больших полушарий головного мозга в качестве *мотиваций* последующих действий. Там они сопоставляются и принимается решение о ближайшей цели поведения, которая затем реализуется подчиненными уровнями управления движением.

Процедуру выбора доминирующей мотивации можно представить

следующим образом. Сигналы об отдельных потребностях вызывают из памяти в ассоциативные области коры соответствующие алгоритмы действий, направленных на их удовлетворение. Последние представляют собой возбужденные зоны нейронных слоев, которые отображают управляющие воздействия на нижележащие уровни управления. Из всех этих порой противоречивых вариантов управления, возбужденные зоны которых взаимно тормозят друг друга, пробивает дорогу вниз к реализации тот вариант, которому соответствует наиболее мощная, т. е. доминирующая над другими, возбужденная зона.

Таким образом, выбор доминирующей мотивации осуществляется как бы голосованием нейронов ассоциативной области коры. Например, при внезапном обнаружении какой-либо серьезной опасности вызванное ею возбуждение, в том числе, возможно, сразу от нескольких органов чувств, подавит все другие потребности (чувства) и переключит действие организма на соответствующую этой новой эмоции реакцию (бежать, принять угрожающую позу и т. п.).

Пока в ассоциативной области доминирует определенная возбужденная зона, она является временным центром управления поведением организма до удовлетворения соответствующей потребности или до подавления этого центра появившейся более обширной зоной возбуждения, требующей других действий. При оценке степени достижения поставленной цели критерием оптимальности является чувство удовлетворения соответствующей основной потребности. На стратегическом уровне выбранная основная цель обычно разбивается на отдельные подцели, которые последовательно выдаются на тактический уровень.

Работа тактического уровня, как упоминалось ранее, начинается каждый раз с формирования моделей среды и организма, ориентированных на спущенную очередную цель, и с высвобождения из памяти отработанных ранее соответствующих планов действий, в которых эта цель в свою очередь может разбиваться на еще более мелкие тактические подцели.

Эффективность работы стратегического уровня как наивысшего в иерархии управления действиями организма характеризует уровень его интеллекта в целом. Она определяется степенью оптимальности принимаемых решений, учета при этом различных факторов, способных влиять на эти решения, длительностью охватываемого периода времени. Интеллектуальные возможности организма обусловлены прежде всего объемом памяти и эффективностью ее использования.

### **3.3. Общая схема УД робота**

#### **3.3.1. Исполнительная система ПР**

Необходимые перемещения рабочего органа и звеньев манипулятора осуществляются с помощью приводов исполнительной системы робота. Наиболее распространены приводы следующих трех типов: пневматические, гидравлические и электрические.

Кисть руки робота (рабочий орган) может быть снабжена пальцами. В большинстве случаев пальцы роботов, применяемых на машиностроительных предприятиях, не имеют сенсоров – средств очувствления. Такие роботы не в состоянии конкурировать в искусности с руками человека. Например, чтобы захватить и перенести некоторый предмет, робот должен сжать его своими пальцами с определенной силой и в заданных точках.

Малейшие отклонения в расположении предмета или его ориентации от заданных требуют соответствующей коррекции усилий, развиваемых пальцами робота при захвате. Так как неочувствленный робот не может получить информацию об отклонениях, он выполняет захват по заранее рассчитанным предельным усилиям.

Робот не всегда может справиться со многими важными технологическими операциями. Поэтому конструкция руки современных промышленных роботов обычно допускает замену рабочих органов, а также использование вспомогательных инструментов. В последнее время быстро развиваются методы выполнения работ основе информации о силах и моментах, возникающих в рабочем органе. Для этого кисть робота должна быть оборудована необходимыми датчиками.

### **3.3.2. Управление и программирование ПР**

Система управления промышленным роботом воспринимает от человека задание на работу, запоминает его, перерабатывает, выдает управляющие команды для руки и рабочего органа и осуществляет контроль за ходом выполнения этих команд. Чтобы передать роботу задание на работу, очевидно, необходимо составить управляющую программу на специальном языке программирования.

Есть и другой способ обучения, характерный только для роботов. Этот способ применялся для обучения и управления самыми первыми в мире промышленными роботами. Он основан на использовании простейшей позиционной обратной связи при вычислении текущего положения исполнительного органа робота в рабочем пространстве.

Обзор методов управления и обучения роботов начнем с рассмотрения принципов управления с позиционной обратной связью.

### **3.3.3. Управление с позиционной обратной связью и программирование методом обучения по I-му циклу**

Прежде чем начать использовать робот, человек-оператор должен перевести систему управления робота в *режим обучения* и записать в память управляющей ЭВМ рабочую программу робота. В процессе выполнения программы рука робота будет переходить от точки к точке рабочего пространства, в каждой из которых пальцы схвата будут сжиматься либо разжиматься.

При программировании методом обучения по I-му циклу человек-

оператор использует переключательную панель управления, общий вид которой представлен на рис. 3.7.

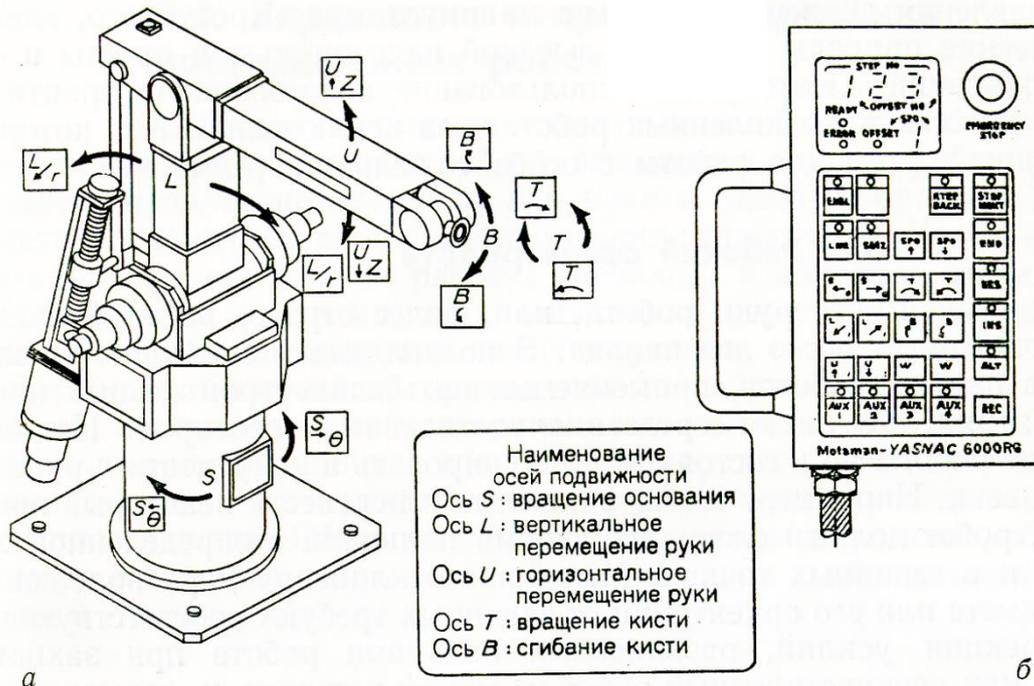


Рис. 3.7. а – робот MOTOMAN фирмы "Ясукава дэнки" (Япония);  
 б – панель обучения робота MOTOMAN

Он переводит систему управления в режим обучения и рукой проводит исполнительный орган робота через заданные точки рабочего пространства. При этом человеку-оператору достаточно лишь нажать кнопку "ПАМЯТЬ" на панели управления и вся необходимая информация о положении каждого звена манипулятора в каждой заданной точке будет автоматически записываться в запоминающее устройство и храниться там в течение нужного времени.

Потоки информации, соответствующие режиму обучения, на рис. 3.8



Рис. 3.8. Потоки сигналов при программировании ПР обучением по I-му циклу и управлении им с обратной связью

представлены белыми штриховыми стрелками. Чтобы робот мог самостоятельно выполнять заданные операции, кроме координат рабочих точек в том же запоминающем устройстве хранится информация о величинах относительных перемещений звеньев в каждой рабочей точке, о состоянии схвата (открыт или закрыт), о форме внешних сигналов, инициирующих начало работы, а также о времени задержки рабочего органа в каждой точке.

После перевода системы управления в рабочий режим робот начинает выполнять записанную программу. Получив стартовый сигнал о начале работы, система управления по очереди выбирает из памяти хранящиеся там величины координат узловых точек траектории и формирует управляющие сигналы на приводы исполнительной системы. Таким образом, рука робота перемещается от точки к точке и выполняет определенные в программе операции.

Чтобы рука робота точно вышла в заданное положение, в процессе обработки управляющих сигналов осуществляется сравнение координат руки с заданными и при необходимости вырабатываются дополнительные корректирующие сигналы.

Такой принцип управления в автоматике получил название **управление с обратной связью**. Он имеет характерную особенность: для каждой операции и для каждого вида изделий в памяти рабочего органа должна быть записана своя управляющая программа. Получив извне информацию о том, какую именно операцию следует выполнить, робот выбирает нужную программу и исполняет ее. Следовательно, один и тот же робот может применяться в очень большом количестве разнообразных технологических процессов. Например, в автомобилестроении один робот может использоваться на сварочной поточной линии при сварке кузовов автомобилей разных марок. Или всего один робот может обслуживать большое количество металлообрабатывающих станков, подавая им необходимые заготовки и забирая готовые детали.

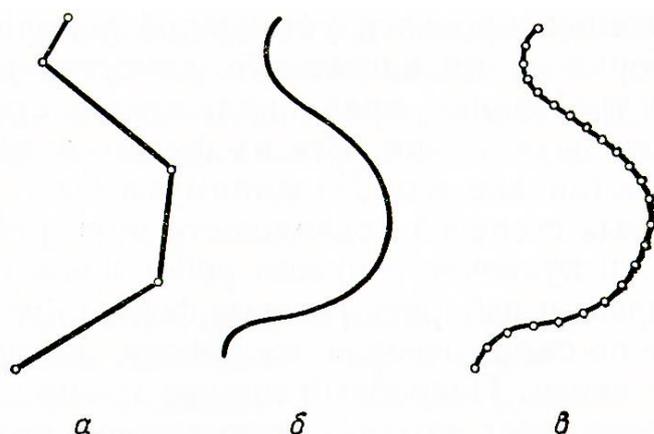


Рис. 3.9. Методы управления перемещением схвата манипулятора по рабочей траектории: а – позиционное управление (РТР); б – контурное управление (СР); в – аппроксимация непрерывной траектории (контурно-позиционное управление).

При управлении с обратной связью рабочая траектория руки робота может описываться несколькими способами.

На рис. 3.9а показан способ, при котором задаются лишь узловые точки рабочей траектории, через которые обязательно должна пройти рука робота в процессе выполнения операций. Управление

ние движением руки по узловым точкам называется позиционным или сокращенно РТР (*PointtoPoint – англ.*).

В другом случае (рис, 3.9б) в памяти робота записывается полная пространственная кривая, по которой должен перемещаться рабочий орган робота. Управление движением по непрерывной траектории называется контурным или просто СР (*ContinuousPath– англ.*).

Контурное управление применяется, когда необходимо обеспечить движение руки строго по заданной кривой, например при дуговой сварке или покраске изделий. На практике при контурном управлении с обратной связью рабочая траектория разбивается на большое количество отрезков с помощью промежуточных точек, как показано на рис. 8.9в. В каждой из точек происходит частичное изменение закона управления.

### 3.3.4. Цикловое управление

До недавнего времени подавляющее большинство промышленных роботов, которые применялись на практике, не имело обратной связи – это были в основном простейшие примитивные роботы. Широкое распространение этих роботов связано с тем, что первые попытки создать универсальные роботы, способные самостоятельно решать любые производственные задачи, не увенчались успехом. В результате пришлось отказаться от расплывчатой идеи полной универсальности. Исследования в этом направлении были временно приостановлены, а внимание ученых переключилось на разработку простых, но пригодных для практического использования роботов.

В то время такой подход оказался очень плодотворным. Дешевые и надежные роботы быстро завоевали популярность в различных отраслях промышленности, что послужило толчком к дальнейшему развитию робототехники.

Первые роботизированные комплексы предназначались в основном для обслуживания металлообрабатывающих поточных линий. Так как эти линии были ориентированы на выпуск достаточно узкого класса изделий, недостаток функциональных возможностей роботов легко компенсировался установкой дополнительного вспомогательного оборудования, а при необходимости и руками человека. В этих условиях требования, предъявляемые к системам управления роботов, были очень невелики. Все их функции заключались в запуске робота и остановке его. До минимума было сведено и количество необходимых степеней подвижности руки робота. Например, при обслуживании кузнечного пресса робот должен лишь подавать заготовки под пресс и забирать готовые формы. Эту операцию оказывается вполне по силам выполнять роботу, который управляется без обратной связи. Подробный анализ процесса обслуживания такого пресса показывает, что роботу достаточно иметь всего 2...3 степени подвижности, да и число рабочих точек траектории сравнительно невелико (не превышает 20).

Цикловое управление заключается в следующем. На штекерной панели системы управления набирается с помощью специальных переключателей последовательность операций и рабочих точек. Координаты точек одна за другой отрабатываются исполнительной системой. В результате рука совершает заданную последовательность движений. При необходимости эта последовательность может циклически повторяться требуемое количество раз.

В случае циклового управления информация о координатах рабочих точек задается с помощью ограничивающих переключателей и упоров. Рука перемещается из текущего положения в направлении следующей узловой точки до тех пор, пока не сработает переключатель или не будет достигнут очередной упор. Информация о положении руки при движении между двумя соседними упорами в систему управления не поступает и не учитывается при формировании управляющих воздействий. Следовательно, контур управления является разомкнутым. Системы циклового управления значительно дешевле сервосистем с обратной связью. Кроме того, они обеспечивают достаточно высокую точность позиционирования и поэтому широко применяются в недорогих промышленных роботах, хотя, конечно, с помощью циклового управления не удастся добиться плавного непрерывного движения руки по всей рабочей траектории.

### **3.3.5. Управление от ЭВМ и интеллектуальные роботы**

Рассмотренные в предыдущих разделах роботы с системами управления с обратной связью могут достаточно легко переходить от одной рабочей траектории к другой. Благодаря этому их можно использовать для выполнения очень широкого круга технологических операций. Казалось бы, что такие роботы можно использовать и в механосборке на предприятиях, выпускающих большое количество видов изделий небольшими сериями. Однако по причинам, указанным ниже, организовать сборочный процесс сложных изделий с помощью таких роботов практически невозможно.

#### ***3.3.5.1. УД руки на основе сенсорной информации***

Система управления роботом должна использовать в качестве обратной связи информацию от датчиков осязания, которые сообщают о касании детали рукой, а также показания силомоментных датчиков об усилиях, развиваемых пальцами схвата при переносе детали. Без этого невозможно построить механическую руку, сравнимую по своей искусности с рукой человека.

#### ***3.3.5.2. Техническое зрение***

Даже в случае самых простых операций по перемещению деталей с места на место робот не сможет взять деталь, если ее положение или ориентация слегка отличаются от записанных в памяти системы управления. Избежать такой ситуации можно лишь при условии, что робот, подобно че-

ловеку, имеет органы зрения. Система технического зрения робота в общем случае должна выполнять следующие функции: распознавать необходимые детали в неупорядоченном потоке, определять положение и ориентацию этих деталей, а также осуществлять контроль правильности выполнения сборочных операций.

### ***3.3.5.3. Новые методы программирования***

В рассматриваемом выше случае программирования методом обучения программа, хранящаяся в памяти системы управления, состоит из координат узловых точек и команд открытия – закрытия схвата в некоторых из этих точек. Однако если условия внешней среды слегка изменятся, то вся программа, полученная методом обучения, окажется непригодной. Кроме того, запоминающее устройство может хранить относительно небольшое число узловых точек рабочих траекторий, поэтому составление программ сборки сложных изделий с помощью метода обучения оказывается практически невозможным.

Помимо рассмотренных выше проблем в настоящее время большое значение приобретает автоматизация контроля качества выпускаемой продукции. Пока темпы автоматизации визуального контроля существенно отстают от уровня развития средств автоматизации производства. В результате человек-контролер очень быстро утомляется, а вероятность обнаружения бракованной детали или изделия становится очень малой. В этой области наибольший эффект ожидается от использования специальных систем машинного зрения.

Чтобы преодолеть все перечисленные трудности, сейчас развернулись исследования по созданию так называемых интеллектуальных роботов, в основе которых лежат современные достижения теории искусственного интеллекта. Об этих новейших роботах мы поговорим в следующих разделах.

### **3.3.6. Направления развития робототехники**

Хотя роботы первых поколений и по сей день приносят большую пользу, совершенно очевидно, что сфера их применения очень ограничена. Сейчас вслед за развитием микроэлектроники роботы также начинают постепенно превращаться из вспомогательных механических устройств в сложные системы переработки информации.

Микроэлектронные управляющие устройства позволяют при тех же, что и ранее, затратах строить роботы с более широким диапазоном выполняемых функций.

Такая тенденция особенно усилилась с появлением в промышленности микропроцессоров. Современные микропроцессоры по своим возможностям сравнимы с мини-компьютерами недавнего прошлого, но стоят значительно дешевле.

Поэтому особенностью всех направлений дальнейших исследований в робототехнике является применение микропроцессоров для расширения функциональных возможностей роботов.

### 3.3.7. Многозвенные манипуляторы, управляемые от ЭВМ

В последнее время промышленные роботы с многозвенным манипулятором, работающим от электропривода и сходным по своей структуре с рукой человека (рис. 3.10) применяют в реальном производстве, например при

выполнении дуговой сварки или сложных механо-сборочных операций.

При управлении многозвенным манипулятором не очень просто определить, какое положение и ориентацию должно иметь каждое его звено, чтобы придать требуемое положение и ориентацию рабочему органу робота. Поэтому в данном случае обучение робота с помощью описанной выше управляющей панели превращается в процесс проб и ошибок, который занимает достаточно много времени.

Оператору гораздо удобнее описывать движения робота с помощью трехмерной прямоугольной системы координат. Чтобы упростить процесс

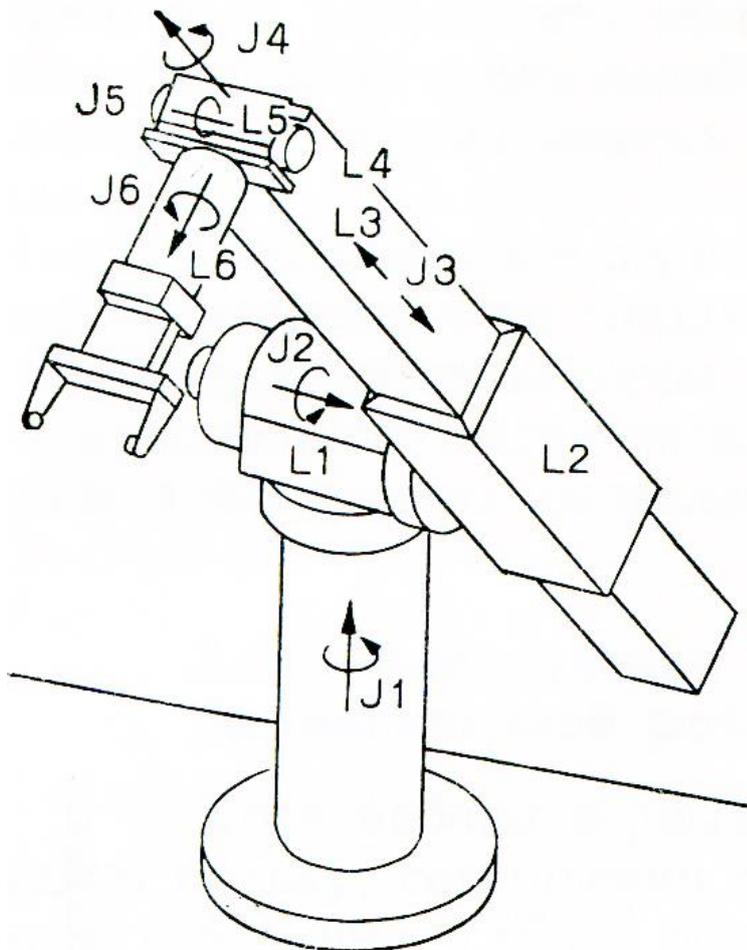


Рис. 3.10. Робот "Стенфорд Арм"

обучения многозвенного робота, на управляющую панель выносятся только команды, задающие перемещения рабочего органа в прямоугольных координатах, например "переместить схват по оси X". Специальный монитор преобразует исходные команды в программы перемещения каждого из звеньев. Эти программы исполняются в режиме обучения, а координаты узловых точек траектории каждого из звеньев записываются в память системы управления робота. Рассмотренный способ обучения проиллюстрирован на рис. 3.11.

Оператор задает в прямоугольной системе координат положение  $(X, Y, Z)$  и ориентацию  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , а компьютер вычисляет соответствующие значения углов для каждой пары смежных звеньев  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$  и выдает необходимые управляющие сигналы на приводы. Таким образом, ЭВМ предоставляет человеку возможность записывать управляющие программы в привычной для него прямоугольной системе координат. Кроме того, если прямоугольную систему координат связать со схватом робота, то перемещения можно будет задавать относительно текущего положения руки. Это в ряде случаев позволяет еще более упростить процесс программирования робота.

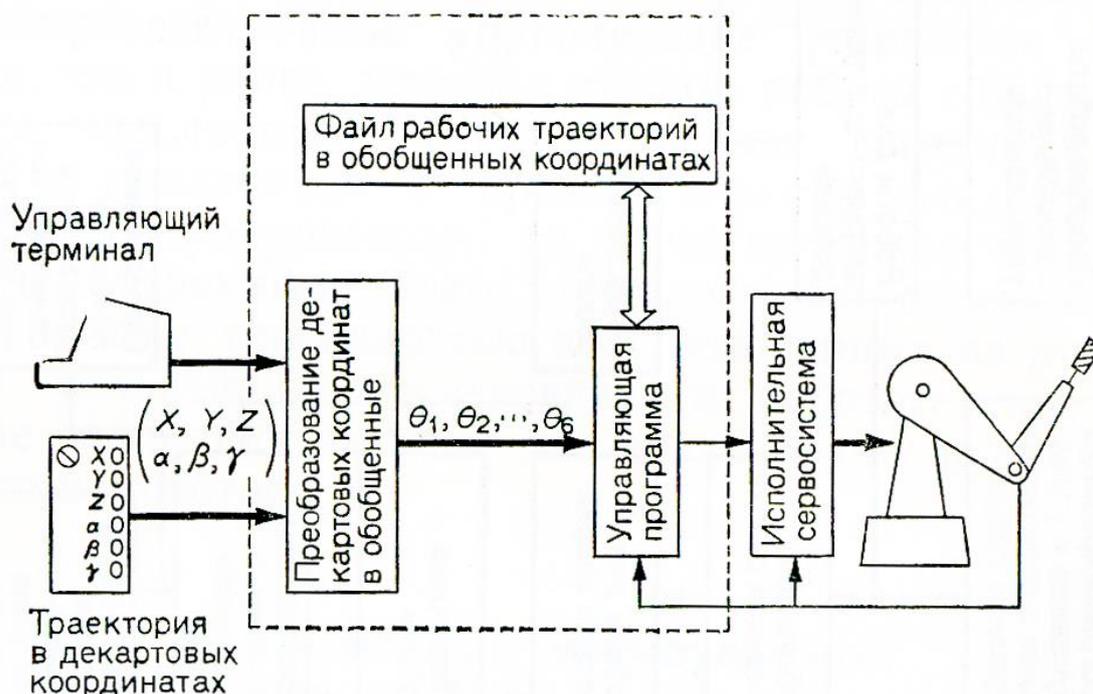


Рис. 3.11. Программирование робота в декартовых координатах и управление роботом в обобщенных (угловых) координатах манипулятора

После того как рассчитаны все значения углов  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$  для каждой узловой точки и занесены в память компьютера, система управления переводится в рабочий режим. Координаты звеньев последовательно считываются из памяти и преобразуются в управляющие сигналы, которые поступают на соответствующий для каждого звена привод. В результате звенья движутся от точки к точке совершенно аналогично рассмотренному ранее случаю позиционного управления.

В случае контурного управления, которое необходимо, например, при выполнении дуговой сварки, количество рабочих точек, записываемых при обучении, должно быть очень большим (рис. 3.9в). Но и здесь компьютер приходит на помощь. В частности, если требуется сделать прямолинейный шов с помощью аппарата дуговой сварки, то человеку достаточно указать

лишь начальное и конечное положения электрода, а также его ориентацию в пространстве и скорость движения руки в процессе сварки. На основании этой информации ЭВМ вычислит необходимое количество промежуточных точек, определит для каждой из точек соответствующие значения углов между звеньями ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ ) и сформирует управляющие сигналы на приводы сервосистемы (рис. 3.12). Это полностью справедливо и для криволинейных рабочих траекторий.

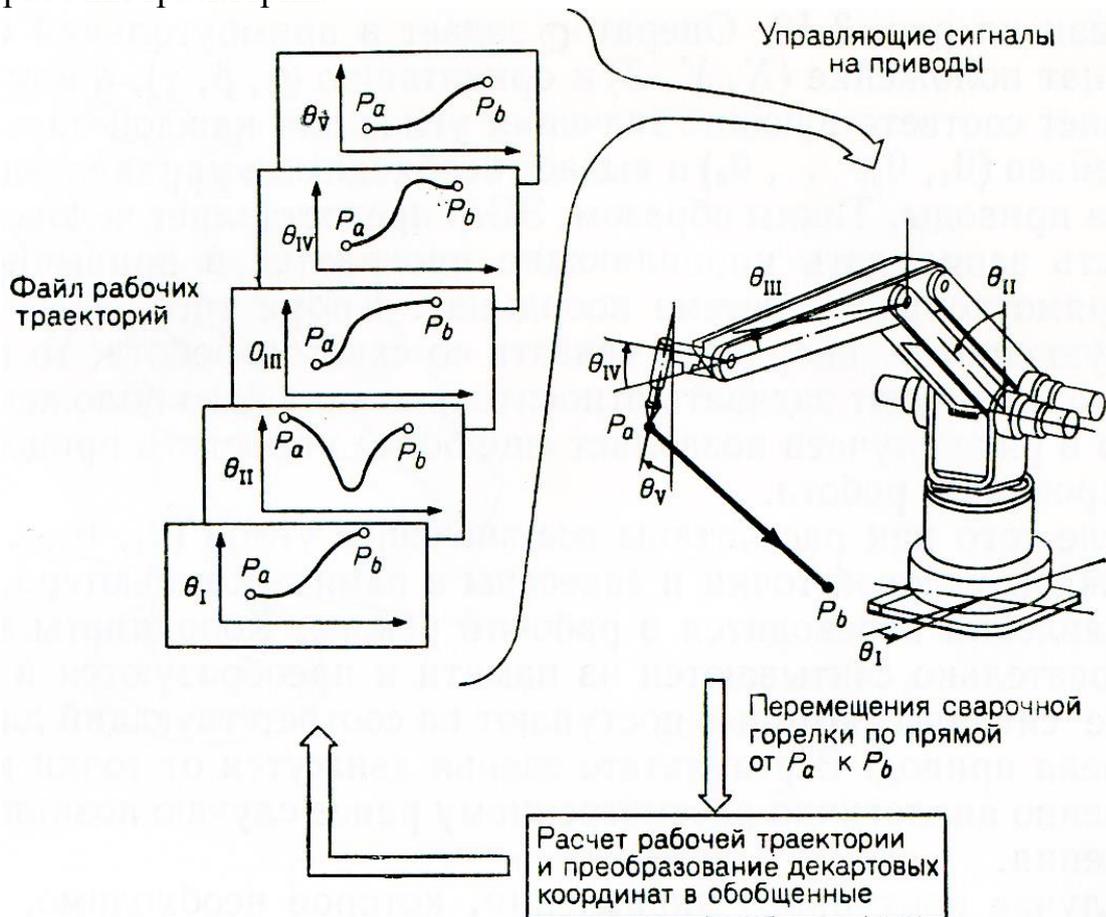


Рис. 3.12. Управление от ЭВМ роботом для дуговой сварки

Следует еще раз обратить внимание на главный недостаток программирования роботов методом обучения по I-му рабочему циклу. Если в процессе дуговой сварки свариваемое изделие слегка сместится из своего первоначального положения, которое оно занимало во время обучения, робот уже не сможет успешно закончить работу.

Только ЭВМ на основании информации от датчиков осязания легко определит действительное положение детали и вычислит корректирующие воздействия на приводы. Следовательно, в таком случае неопределенность в расположении объектов не вызывает затруднений у робота. Более того, интеллектуальные роботы могут не только определять координаты объектов, но и, подобно человеку, узнавать нужную деталь среди множества других.

Аналогично выполняется и окраска изделий с помощью робота. В процессе окраски обрабатываемые изделия, как правило, перемещаются или вращаются с постоянной скоростью, а рука робота с краскораспылителем движется вслед за ними. Совершенно очевидно, что управлять таким движением руки без ЭВМ практически невозможно (программу перемещения руки робота легко составить лишь в случае, когда обрабатываемые изделия неподвижны). Если скорость перемещения деталей задана, компьютер без труда вычисляет текущее положение изделия в каждый момент времени и управляет перемещением руки окрасочного робота в это положение.

Подводя итоги, отметим следующее. ЭВМ в системах управления роботами значительно упрощают процесс программирования роботов, делают его более гибким и эффективным. С их помощью система управления осуществляет контроль за работой каждой составной части робототехнической системы, распознает различные препятствия и самостоятельно корректирует рабочую программу.

Они способны проводить сложный логический анализ состояния внешней среды и по результатам этого анализа выбирать из памяти управляющей системы одну из множества рабочих программ.

Таким образом, появление ЭВМ – качественно новый этап в развитии средств управления роботами.

### **3.3.8. Использование тактильной информации**

Если бы рука робота могла получать хотя бы часть той информации о среде, которую дают человеку многочисленные рецепторы, расположенные в его руке, робот получил бы возможность справляться с десятками новых операций.

Особую важность органы осязания, или датчики тактильной информации, приобретают при сборке сложных высокоточных изделий. В этом случае необходимо, чтобы рука робота могла определять расположение и ориентацию близлежащих объектов, получать данные об их размерах и форме, ощущать прикосновение к деталям, знать и управлять распределением усилий между пальцами рабочего органа и в суставах руки, распознавать и предотвращать проскальзывание при переносе детали в схвате.

Современные достижения в технологии новых материалов создают предпосылки для разработки искусственных сенсоров, близких по своим возможностям к рецепторам человеческой кожи. В настоящее время исследования по созданию и применению сенсоров осязания в робототехнике наиболее интенсивно развиваются в трех следующих направлениях.

### 3.3.8.1. Управление с тактильной обратной связью

В случае позиционного управления по программе, полученной методом обучения, малейшее отклонение детали от положения, зафиксированного при обучении, может помешать, сборочному роботу выполнить захват детали или приведет к смещению шва при сварке.

Если же рука робота оснащена специальными чувствительными элементами, которые распределены по поверхности рабочего органа, то управляющая ЭВМ сможет на основании информации о касании детали рукой выработать необходимые корректирующие воздействия на приводы. Пример захватывающего устройства, пальцы которого оборудованы сенсорами касания, показан на рис. 3.13.

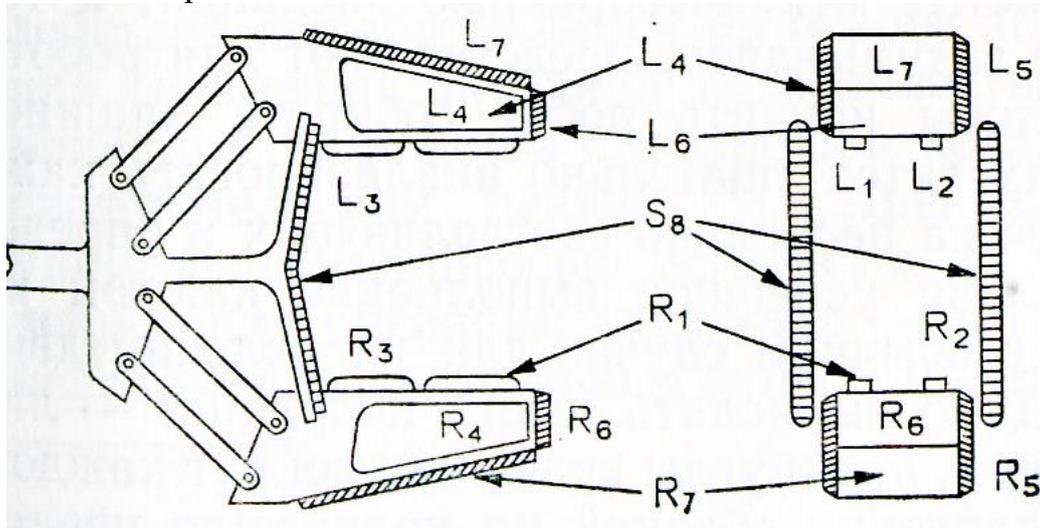


Рис. 3.13. Размещение датчиков тактильной информации в захватывающем устройстве робота

С помощью тактильной обратной связи робот может точно определить действительное расположение деталей, их размеры и форму и соответствующим образом скорректировать рабочую программу.

### 3.3.8.2. Управление с силовой обратной связью

В простейшем случае основным элементом датчика информации о силах, которые развивает рабочий орган робота, может служить обыкновенная пружина. В процессе выполнения какой-либо операции величина растяжения или сжатия пружины регистрируется измерительными приборами и передается в управляющую ЭВМ. Там результаты измерений обрабатываются и рассчитываются корректирующие воздействия на каждый из приводов исполнительного механизма. Т.е., информация о силах преобразуется в сигналы обратной связи для сервомеханизмов каждого звена манипулятора. Силовое очувствление дополнительно позволяет роботу выполнять следующие функции:

1. Оценивать вес детали в схвате.
2. Определять, касается или нет деталь в схвате другого объекта в рабочей области.
3. Вставлять стержень в отверстие.
4. Вращать рукоятку.
5. Манипулировать объектом с помощью двух рук одновременно.

Перечисленные функции помогают роботу самостоятельно решать целый ряд новых, ранее не доступных для него задач. Например, с помощью информации о касании объектов (функция 2) робот может автоматически обходить препятствия или укладывать однотипные детали в какую-либо тару.

Действуя двумя руками (функция 5), робот способен перемещать длинные несбалансированные детали. При этом одна из рук управляется позиционно, а вторая следует за ней с помощью силовой обратной связи.

### 3.3.8.3. Анализ силовой информации

Даже самые простые механосборочные операции, которые человек выполняет, не задумываясь, представляют для робота нетривиальную задачу. Чтобы научить робота собирать машиностроительные изделия, приходится тщательно анализировать каждую операцию, разбивать ее на несколько составляющих и определять условия, гарантирующие успешное выполнение каждой из этих составляющих.

Если в обычном случае для управления движением руки ЭВМ необходимо вычислить шесть координат – линейные перемещения по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и углы вращения вокруг каждой из этих осей, – то при управлении сборкой их количество удваивается. Помимо информации о положении и ориентации рабочего органа требуется учитывать и управлять распределением сил по трем координатным осям и вращающим моментам вокруг этих осей.

Текущие значения координат и сил сравниваются управляющей ЭВМ с соответствующими значениями, определенными при теоретическом исследовании данной операции, и при необходимости вырабатываются корректирующие воздействия.

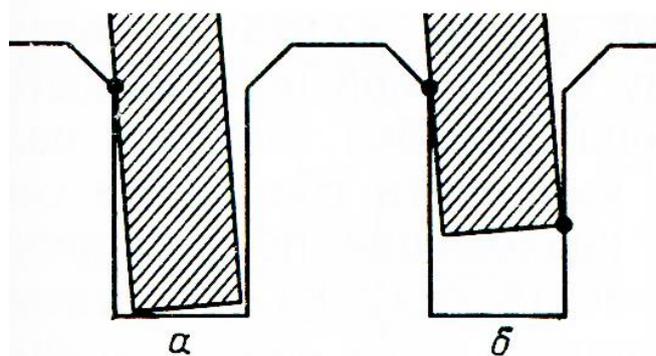


Рис. 3.14. Выполнение операции "вал – втулка": а – касание в 1-й точке; б – касание в 2-х точках

Следует отметить, что в большинстве практических случаев комбинированный анализ позиционной и силовой информации оказывается чрезвычайно сложной задачей.

На рис. 3.14 рассмотрен процесс выполнения операции "вал – втулка", которая является базовой механосборочной операцией. Как следует из рисунка, если при чисто позиционном

управлении точность позиционирования достаточно велика, то вал касается стенки втулки в худшем случае лишь в одной точке (рис. 3.14а). Это позволяет успешно завершить операцию. Однако, если система управления не обеспечивает требуемой точности позиционирования либо зазор между валом и втулкой слишком мал, вал, как правило, упирается в стенки в двух точках (рис. 3.14б). Из такого положения он уже не сможет передвигаться дальше, однако, если изменить направление приложенной силы, операция может быть успешно завершена.

Следовательно, чисто позиционный принцип не пригоден при управлении роботизированной сборкой высокоточных изделий. В то же время при управлении с силовой обратной связью робот имеет возможность анализировать и соответствующим образом корректировать направление и величину прилагаемых сил.

Способ управления сборкой, при котором корректирующие воздействия вырабатываются на основе анализа сил и моментов реакции, называют активной податливостью. На практике часто применяются устройства с пассивной податливостью. Оно механически компенсирует нежелательные силы и моменты и направляет цилиндрические детали в отверстие.

Специалисты центрального научно-исследовательского института японской фирмы "Хитачи" создали сборочную систему с активной податливостью. С помощью пружинного устройства она способна измерять силы, развиваемые схватом, автоматически выполнять сближение собираемых деталей, выбирать наиболее подходящие по посадочным размерам пары деталей, а также заменять одну из сопрягаемых деталей в случае невозможности завершить сборочную операцию. В основу этой системы положен описанный выше принцип управления с силовой обратной связью. Силовое управление дало возможность выполнять операции типа "вал – втулка" с очень малыми зазорами между деталями и без вспомогательных направляющих устройств.

### 3.4. Зрение промышленных роботов

С помощью глаз промышленный робот, применяемый в реальном производственном процессе, должен распознавать нужные детали, определять их положение в пространстве, а также выполнять разнообразные контролируемые функции.

**Распознавание деталей.** Среди множества движущихся по ленте конвейера деталей робот должен узнавать заданные детали и вычислять их текущие координаты. "Узнавание" происходит посредством сравнения изображения детали на конвейере с образами деталей определенного класса, которые хранятся в памяти робота.

**Определение положения и ориентации деталей.** Робот должен определять действительное положение и ориентацию собираемых дета-

лей, а также точек их сопряжения. С этой целью на практике начинают применяться специальные распознающие устройства, реализованные на БИС и СБИС (большие интегральные схемы).

**Контроль качества деталей.** *Визуальный контроль качества деталей и узлов* в условиях автоматизированного производства является трудоемким, но малоэффективным средством. Кроме того, в современном производстве появляются отрасли, где человеческий глаз просто не в состоянии справиться с функциями контроля. В частности, для него неуловимы дефекты в интегральных схемах или ошибки в нанесении маскирующих покрытий при изготовлении этих схем. Другим примером, где необходимо зрение робота, может послужить контроль правильности формы круглых или шарообразных деталей. Среди рассмотренных приложений машинного зрения сейчас наибольшее внимание уделяется определению точного расположения деталей и контролю их качества.

### **3.4.1. Условия эффективного применения систем технического зрения**

Главным требованием, предъявляемым к промышленным системам технического зрения, является максимально возможное снижение их стоимости. При этом, однако, такие системы должны обеспечивать распознавание в реальном масштабе времени, гарантировать достоверность результатов распознавания и адаптироваться при изменении класса распознаваемых деталей. Ниже поясняется, каким образом разработчики систем машинного зрения пытаются найти компромисс между стоимостью систем и необходимыми функциональными возможностями.

#### ***3.4.1.1. Обеспечение хорошей видимости объектов распознавания***

Важнейшим условием нормальной работы систем машинного зрения является возможность получения четкого изображения наблюдаемой детали. Изображение трехмерного объекта на экране полностью зависит от его ориентации в пространстве. Поэтому распознавание произвольно ориентированных деталей оказывается трудновыполнимой задачей. В большинстве применяемых на практике систем наблюдение объектов ведется по 2...Звзаимно перпендикулярным направлениям, а ЭВМ выполняет распознавание трехмерных деталей по набору их плоских изображений. Если распознаваемая деталь частично перекрывается другим объектом, то анализ полученного изображения возможен лишь с помощью сложных методов искусственного интеллекта. В практических случаях обычно применяются различные механические устройства, которые отделяют детали друг от друга до того, как они попадут в поле зрения телевизионной камеры.

К сказанному следует добавить, что в настоящее время, когда машинное зрение делает свои первые шаги, большинство промышленных систем работает лишь с двухцветным черно-белым изображением. Для обеспечения четкого контрастного изображения необходимо создавать специальные условия освещения деталей в рабочей области. Как правило, для каждого класса задач распознавания приходится проектировать свои устройства подсветки.

#### ***3.4.1.2. Обработка изображений в реальном времени***

Так как результаты работы системы технического зрения (текущее положение детали на ленте конвейера и информация о пригодности детали) определяют в каждый момент времени порядок действий всего оборудования робототехнического комплекса, необходимо, чтобы обработка изображений проводилась как можно быстрее по мере поступления деталей. Чтобы обеспечить работу системы распознавания в реальном масштабе времени, предпринимаются наряду с прочими следующие мероприятия:

- Упрощаются алгоритмы распознавания за счет перехода к двухцветному черно-белому изображению.
- Применяются аппаратные устройства распознавания, например различные специализированные процессоры изображений.
- Упрощаются методы распознавания за счет отказа от излишней универсальности и разработки простых эффективных алгоритмов для узкого класса задач.

#### ***3.4.1.3. Обеспечение достоверности результатов распознавания***

Одним из главных способов обеспечения правильности распознавания является тщательный выбор идентификационных признаков, на основании которых можно различить изображения разных деталей. Отбранное множество признаков проверяется на однозначность с помощью моделирования на ЭВМ. Если различным деталям соответствуют одинаковые признаки, полученное множество пересматривается. В результате либо вводятся дополнительные признаки, либо удаляются несущественные. В случае черно-белого изображения множество необходимых признаков значительно сокращается, что позволяет осуществлять более полную проверку и тем самым повышать достоверность результатов распознавания. Помимо правильного выбора идентификационных признаков большое внимание уделяется созданию методов распознавания, устойчивых к ошибкам при сравнении по одному или нескольким признакам. Для этого, в частности, можно потребовать, чтобы решение о совпадении анализируемого изображения с моделью, записанной в память системы при обучении, выносилось на основании результатов

сравнения не по одному признаку, а по некоторой группе независимых признаков.

#### 3.4.1.4. Адаптация к изменению класса распознаваемых объектов

Все средства автоматизации производственных систем, выпускающих продукцию мелкими и средними сериями, должны обладать определенной гибкостью по отношению к номенклатуре изделий. Следовательно, и системы машинного зрения должны располагать гибкими автоматизированными средствами построения эталонных моделей распознаваемых объектов. К числу таких средств можно отнести диалоговые системы геометрического моделирования, которые позволяют создавать библиотеки моделей машиностроительных деталей в режиме диалога с ЭВМ. Кроме того, если на предприятии имеется система автоматизированного проектирования деталей и изделий, то модели, пригодные для использования системой распознавания, являются результатом одного из этапов автоматизированного проектирования. В этом случае они сразу генерируются в форме, пригодной к записи в память распознающей ЭВМ. С помощью рассмотренных средств построения эталонных моделей система машинного зрения может легко настраиваться на работу с заданным классом деталей.

#### 3.4.2. Структура системы технического зрения

Структура аппаратных средств, применяемых сейчас в промышленно-сти систем технического зрения, представлена на рис. 3.15.

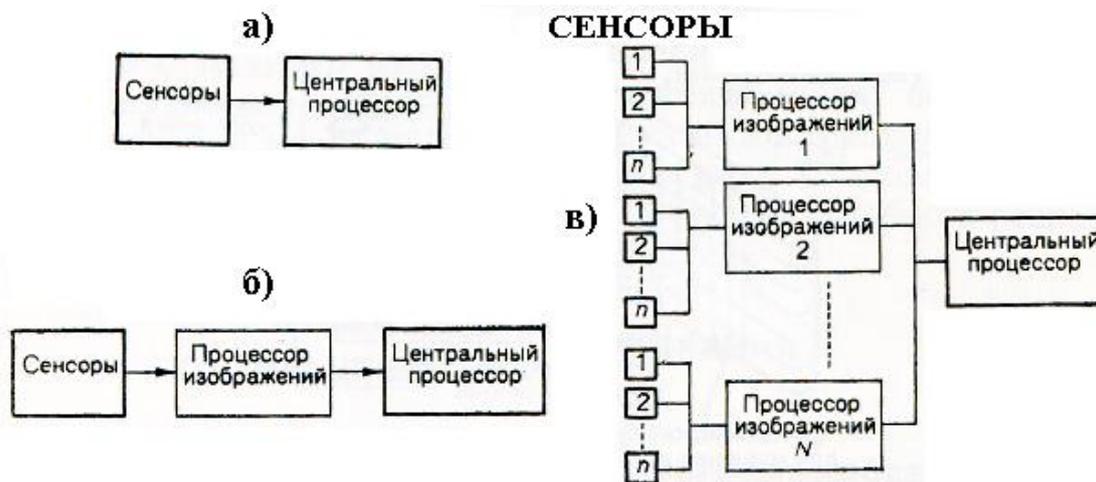


Рис. 3.15. Структура аппаратных средств промышленных систем технического зрения

**Сенсоры.** Приемниками и первичными преобразователями видеоинформации, как правило, служат промышленные телекамеры на основе вакуумных трубок – видиконов, карниконов, видиконов с кремниевой мишенью и других. В последнее время все большую популярность приобретают полупроводниковые сенсоры, в частности камеры и линейки на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-камеры и ПЗС-линейки). Особенно эф-

фективным представляется применение ПЗС-линеек. Они успешно справляются с выполнением всех перечисленных выше функций систем технического зрения, в том числе и с визуальным контролем деталей.

**Распознающее устройство.** Еще несколько лет назад как первичная обработка, так и распознавание осуществлялись в основном с помощью специализированных аппаратных средств, предназначенных для анализа изображений узкого класса объектов. Сейчас все эти операции взяли на себя микроЭВМ или мини-ЭВМ. Но в сложных случаях компьютеры не успевают в реальном масштабе времени осуществлять выделение признаков идентификации и сравнивать полученное изображение с эталоном. Поэтому для повышения быстродействия систем распознавания применяются описанные ниже процессоры изображений.

**Процессор изображений.** При анализе изображений наибольшее количество вычислений требуется произвести при построении так называемого проволочного каркаса изображения, который затем и сравнивается с эталоном по ряду признаков идентификации. Ребрами каркаса являются границы между освещенными и теневыми участками поверхности наблюдаемой детали. Именно для повышения скорости выделения границ и разработаны процессоры изображений, которые осуществляют частично-параллельную обработку поступающей видеоинформации.

Почти все используемые на практике процессоры изображений имеют приблизительно одинаковую структуру. И здесь стремление снизить стоимость заставляет вводить всевозможные упрощения и ограничения. На рис. 3.16 приведен в качестве примера один из специализированных процессоров изображений, предназначенный в данном случае для обнаружения дефектов печатных плат. Телевизионная камера формирует черно-белое изображение платы. Это изображение разбивается на 7 строк; каждая из них соответствует горизонтальному участку, который пробегает луч развертки на экране. Затем каждая строка записывается в свой регистр сдвига, после чего, как показано на рис. 3.16, участок изображения размером  $7 \times 7$  сравнивается с эталонной моделью, причем сравнение осуществляется параллельно для каждого регистра.

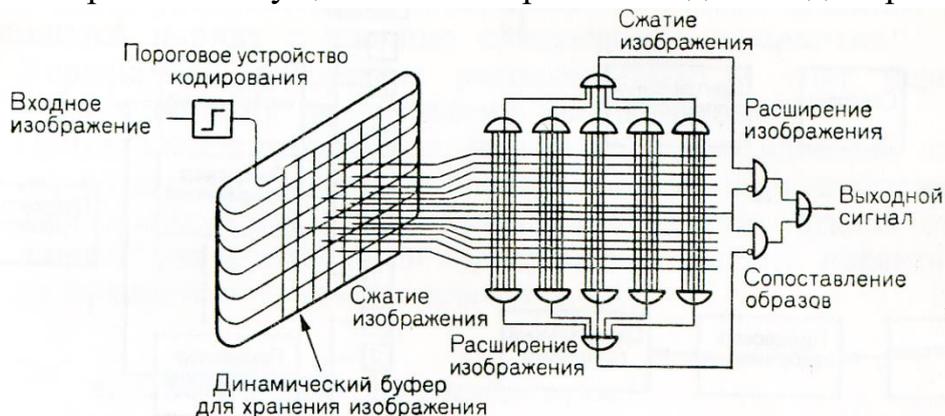


Рис. 3.16. Матричный процессор изображений для обнаружения дефектов печатных плат

Очевидно, при такой организации операции сопоставления изображения и модели решение о наличии или отсутствии дефекта может быть принято сразу без дополнительного анализа результатов сравнения. Процесс распознавания выполняется всего за один кадр. Следовательно, рассмотренное устройство контроля вполне работоспособно в реальном масштабе времени.

### 3.5. Языки программирования промышленных роботов

Ранее мы рассмотрели программирование роботов методом обучения по I-му циклу. Управляющая программа состояла всего лишь из последовательности значений углов между смежными звеньями манипулятора в каждой рабочей точке и информации о необходимом количестве циклов. Если число рабочих точек невелико, то программирование обучением не вызывает затруднений. Однако построение с помощью этого метода программ управления сборкой или каким-либо другим сложным технологическим процессом оказывается очень трудоемким, требует высокой квалификации оператора, выполняющего обучение, и занимает много времени. Поэтому для программирования таких задач приходится разрабатывать специальные средства автоматизации, и в первую очередь языки программирования роботов.

По своему уровню все существующие языки программирования роботов можно подразделить на две большие группы – проблемно ориентированные (языки объектного уровня) и языки уровня манипулятора. Фрагмент программы на языке уровня манипулятора приведен в верхней части рис. 3.17.

В этом случае программа представляет собой последовательность команд, каждая из которых задает величину и направление перемещения рабочего органа. Перед началом выполнения программы точкам  $P_i$  и другим, показанным на рис. 3.17, сопоставляются абсолютные значения их координат. Эти координаты запоминаются системой управления и преобразуются в значения углов между звеньями, после чего программа принимает рабочий вид и может быть исполнена необходимое число раз.

Чтобы осуществлять заданные в такой программе манипуляции, роботу не требуется информации о форме или размерах переносимой детали. Достаточно лишь указать координаты точек, в которых следует выполнять захват каждой детали. Языки объектного уровня позволяют описывать задание с помощью команд, близких по своему содержанию к отдельным технологическим операциям. В этом случае указывать перемещение руки робота не требуется, что, конечно же, очень удобно для технологов, не имеющих навыков обращения с роботами. Программа на объектном языке анализируется компьютером, который планирует необходимые для реализации каждой технологической операции перемещения руки робота, вычисляет узловые точки рабочих траекторий и формирует управляющие сигналы на приводы звеньев робота. Пока языки объектного уровня нахо-

дятся в стадии исследований и экспериментальных проектов. На практике применяются, как правило, языки уровня манипулятора.

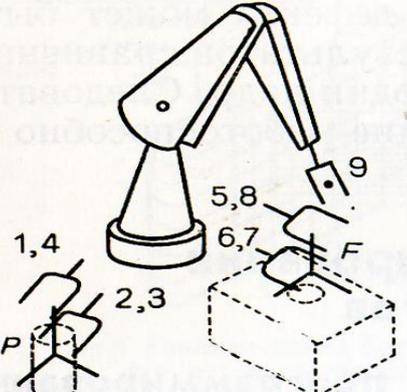
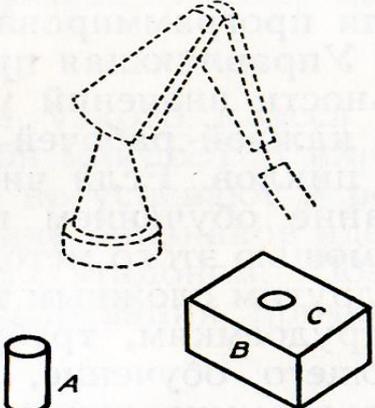
	Описание работы	Последовательность операций
Программирование на языке уровня манипулятора		<ol style="list-style-type: none"> <li>1 . Перевести схват в точку, находящуюся над точкой <i>P</i> на расстоянии 50 мм</li> <li>2 . Опустить схват в точку <i>P</i></li> <li>3 . Сжать пальцы схвата</li> <li>4 . Поднять схват на 50 мм над точкой <i>P</i></li> <li>5 . Перевести схват в точку, находящуюся над точкой <i>F</i> на расстоянии 50 мм</li> <li>6 . Опустить схват в точку <i>F</i></li> <li>7 . Раскрыть пальцы схвата</li> <li>8 . Поднять схват на 50 мм над точкой <i>F</i></li> <li>9 . Перевести схват в исходную точку <i>I</i></li> </ol>
Программирование на языке объектного уровня		<p>ПОМЕСТИТЬ ВТУЛКУ <i>A</i> В ОТВЕРСТИЕ <i>C</i> ОБЪЕКТА <i>B</i></p>

Рис. 3.17. Примеры программирования на языке уровня манипулятора и на языке объектного уровня

Проблемы создания языков объектного уровня находятся в тесной связи с более общими задачами исследований по искусственному интеллекту. Не случайно поэтому, что сама идея языков программирования роботов зародилась в научных центрах, занимающихся теоретическими вопросами машинного разума. Первый в мире робототехнический язык AL был разработан в Станфордском университете (США). Изначальная версия AL относилась к языкам уровня манипулятора, но впоследствии предпринимались попытки повысить уровень этого языка до объектного. Проект AL послужил отправной точкой для создания целого ряда других экспериментальных систем программирования с входным языком объектного уровня. Среди них наиболее известны RAPT лаборатории по искусственному интеллекту Эдинбургского университета и AUTOPASS фирмы IBM. Первые языки уровня манипулятора: VAL фирмы "Юнимэйшен" (США), SIGMA фирмы "Оливетти" (Италия), INDAM международного исследовательского центра SRI.

## 4. Механизмы и элементы конструкций ПР

### 4.1. Механизмы ПР

Независимо от конкретных кинематических схем манипуляторы промышленных роботов, как правило, строятся по единому принципу: начиная от основания, последовательно друг с другом соединяются механизмы, причем каждый механизм имеет один привод и задает перемещения по одной степени подвижности.

Имеются исключения, например, некоторые механизмы могут задавать движения по двум или трем степеням подвижности. У модульных роботов механизмы представляют собой модули, которые можно собирать в различных сочетаниях. У немодульных роботов механизмы обычно соединяются в определенной последовательности, но, как у модульных роботов, как правило, механизмы имеют конструктивную самостоятельность, поэтому удобно их анализировать и конструировать отдельно.

Анализ типовых, наиболее распространенных конструкций манипуляторов, выполненных по разным схемам, показывает, что можно выделить небольшое число типов механизмов, каждый из которых характеризуется общими чертами.

*Механизмы межпозиционного перемещения* имеются у подвесных (портальных) ПР и перемещающихся по рельсовому пути напольных ПР, а также роботов-штабелеров. Такие механизмы реализуют кинематическую пару *1Пу* и характеризуются большими ходами перемещений (3...10 м и более). Привод этих механизмов обычно электромеханический, точность их невысока.

*Механизмы поворота вокруг вертикальной оси* имеются у многих напольных роботов. Они реализуют кинематическую пару *1Вз* или *2Вз*. Основными особенностями этих механизмов являются большие углы поворота, большие массы и моменты инерции поворотных частей, отсутствие нагрузок от сил тяжести.

*Механизмы качания звеньев* работают в вертикальной плоскости руки или отдельного звена складной руки. Обычно реализуют кинематические пары *2Ву* или *3Ву*. Здесь массы и моменты инерции подвижных частей невелики, но приводы нагружаются силами тяжести, поэтому требуется решения задача их уравнивания. Для роботов с выдвижной рукой диапазоны углов узкие ( $\pm 30^\circ$ ), со складной рукой эти значения выше.

*Механизмы выдвижения руки роботов* работают, реализуя кинематическую пару *3Пх* в прямоугольной, цилиндрической или сферической системе координат. Направление поступательного перемещения (горизонтальное или близкое к нему) и величина перемещения (ход – может превышать 1 м) зависят от группы грузоподъемности.

*Механизмы подъема* реализуют кинематическую пару *1Пз* или *2Пз*. Обычно ходы этих механизмов невелики.

**Механизмы ориентирования** задают повороты по одному, двум или трем углам. Для способов реализации механизмов применяют их составные части (двигатели, передачи, элементы несущих конструкций).

## 4.2. Приводные механизмы ПР

Приводы ПР содержат источник энергии с двигателем, трансмиссию с коммуникацией и тормозными устройствами, систему управления с датчиками. На рис. 4.1 изображена структура привода ПР.

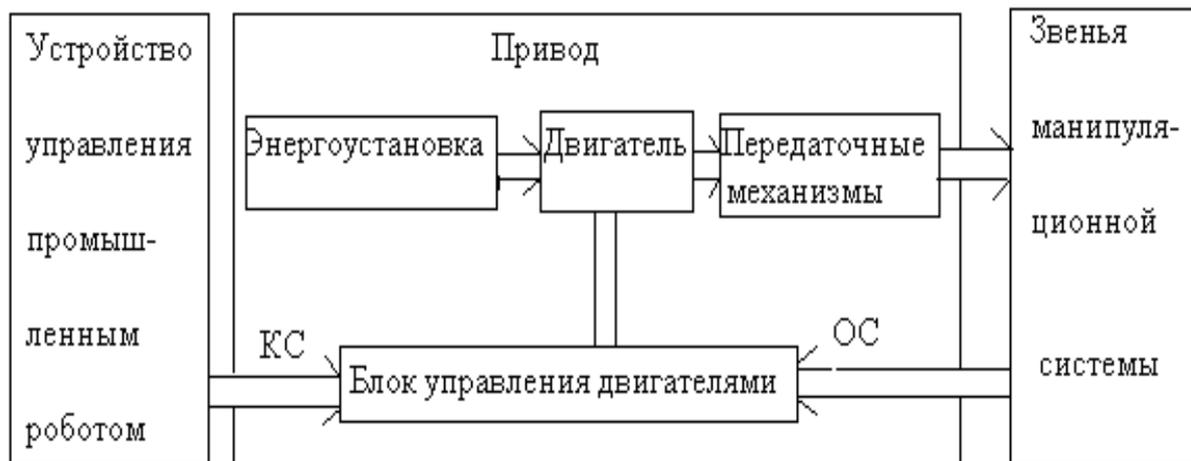


Рис. 4.1.

Требования к приводам ПР:

- минимальные масса и габариты при высоком к.п.д.;
- автоматическое управление и регулирования;
- быстродействие;
- надежность и долговечность;
- удобство монтажа и обслуживания, бесшумность работы.

**По степени управляемости** приводы различают: *нерегулируемые* (работают с постоянной скоростью); *регулируемые* (работают с заданной скоростью); *следающие* (перемещают звенья ПР с заданной точностью); *адаптивные* (при изменении условий работы выбирают оптимальные параметры управления).

**По виду используемой энергии** двигатели приводов различают: *пневматические, гидравлические, электрические*. Приводы ПР могут быть *комбинированные*, использующие разные виды энергии.

### 4.2.1. Пневматический привод ПР

Пневмопривод ПР имеет высокое быстродействие, прост, надежен, дешев, поэтому в промышленности его используют в 50 % случаев. Пневмопривод обеспечивает непосредственное воздействие на звенья манипулятора.

Недостаток пневмопривода – плохая управляемость из-за сжимаемости воздуха, что снижает точность позиционирования во многих точках рабочей зоны. Этот же недостаток энергоносителя ограничивает его грузоподъемность до 20 кг.

Пневмопривод применяется в ПР с цикловым управлением.

Функционально пневмопривод содержит:

- блок подготовки рабочего тела (воздуха);
- блок распределения сжатого воздуха;
- блок исполнительных двигателей;
- систему передачи сжатого воздуха в системе.

В *блоке подготовки* воздух сушат и очищают от пыли.

*Блок распределения* содержит распределительные устройства с золотниками и клапанами, которые по заданной программе открывают или закрывают доступ сжатого воздуха в рабочие полости исполнительных двигателей. Используют пневмораспределители с управлением от электромагнитов и командоаппаратов. При определенных условиях (взрывоопасная среда, радиация) используют распределители с пневматическим управлением.

В качестве *блока исполнительных двигателей* используют цилиндры с прямолинейным или вращательным движением поршня одно- или двустороннего действия. На каждую степень подвижности предусматривается свой исполнительный двигатель (пнеumoцилиндр). Его конструкция обеспечивает заданные перемещения, скорости и усилия.

Захватное устройство ПР тоже может иметь двигатель, который обеспечивает захват объекта манипулирования, его удержание при перемещении и освобождение после установки в заданной точке.

Рабочий цикл выполняется каждым двигателем в определенной последовательности в соответствии с требованиями технологического процесса и осуществляется по программе, выполняемой управляющим устройством робота. В системах передачи сжатого воздуха между устройствами привода используются пневмопроводы различного сечения, рассчитываемого исходя из заданных условий работы. Типовая схема пневмопривода одной степени подвижности ПР (рис. 4.2) состоит из входного штуцера 12, через который осуществляется подвод сжатого воздуха под давлением 0,5...0,6 МПа из заводской пневмосети к ПР.

Вентилем 11 производится включение привода в работу. Влажоотделитель 10 служит для подготовки сжатого воздуха и удаления из него водяного конденсата, который вызывает коррозию и увеличивает трение трущихся деталей. Далее посредством соответствующей регулировки редукционного клапана 9, производится предварительная настройка давления сжатого воздуха, поступающего к элементам привода. Это давление является номинальным и устанавливается согласно техническим требованиям на ПР. Маслораспылитель 8 тоже участвует в подготовке воздуха и

обеспечивает распыление масла, необходимого для смазки перемещающихся элементов исполнительного двигателя (цилиндра 2) и распределителя 6. В качестве 2 и 6 используются золотники и клапаны. Обычно управление распределителем производится от электромагнита. Распределители служат для перераспределения потоков сжатого воздуха в соответствии с управляющей программой и требованиями технологического процесса.

Согласно схеме (рис. 4.2), перемещение поршня 1 на шаг  $S$  происходит вправо вместе со штоком 3, рукой 4 и захватом 5. Дроссель 7 служит для регулировки скорости перемещения подвижных частей двигателя. К числу основных параметров, характеризующих пневмодвигатель, относятся:

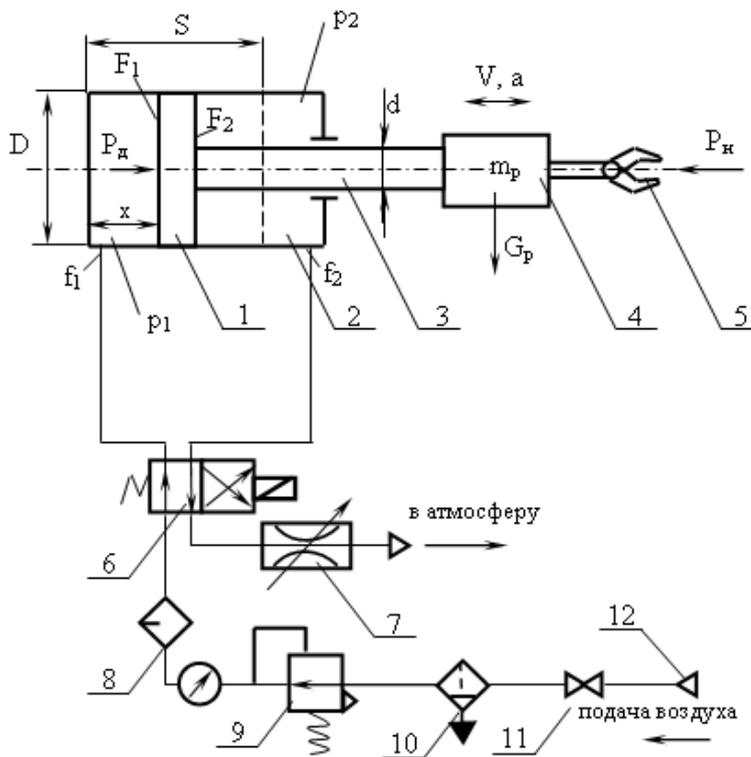


Рис. 4.2.

эффективная площадь поршня в рабочей (поршневой)  $F_1$  и выхлопной  $F_2$  (штоковой) полостях; рабочий ход поршня  $S$ ; текущая координата  $x$ ; скорость  $v$  и ускорение  $a$  поршня; масса  $m_p$  исполнительного устройства (руки ПР); давление воздуха в рабочей  $p_1$  и выхлопной полостях  $p_2$ ; эффективные площади сечений трубопроводов на входе  $f_1$  и выходе  $f_2$ ; диаметры поршня  $D$  и штока  $d$ ;

движущая сила  $P_D$  и сила нагрузки (потребная)  $P_H$ .

Выбор параметров пневмоцилиндра производится следующим образом. Диаметр поршня цилиндра, расположенного горизонтально:

$$D = B \sqrt{P_H / [k_1 p_c (1 - k_2)]}; \quad (4.1)$$

для вертикально расположенного цилиндра:

$$D = B \sqrt{(P_H \pm G) / [k_1 p_c (1 - k_2)]} \quad (4.2)$$

где  $p_c$  – давление воздуха в сети (0,5...0,6 Мпа);

$P_H$  – нагрузка, Н;

$G$  – вес исполнительного устройства, Н;  
 $k_1$  – коэффициент, учитывающий отношение  $P_H/P_D$ , выбираемый в зависимости от скорости  $v$  и давления  $p_c$  (в среднем  $k_1 = 0,4 \dots 0,5$ );  
 $k_2$  – коэффициент, учитывающий трение в цилиндре; выбирается в зависимости от  $P_H$ ; при  $P_H = 0,6 \dots 60$  кН,  $k_2 = 0,5 \dots 0,05$ ;  
 $B$  – постоянная,  $B = 11,3$ ;  
 $G$  – вес подвижных частей исполнительного устройства с объектом манипулирования (знак «+» ставят при опускании поршня, знак «-» – при его подъеме).

Длину цилиндра выбирают в зависимости от хода поршня.

Для цилиндров двустороннего действия  $S = (8 \dots 10)D$ .

При больших ходах поршня, шток рассчитывают на устойчивость. В ПР применяются пневмоцилиндры с  $D = 32 \dots 80$  мм и ходом  $S$  до 1000 мм.

Сила нагрузки  $P_H$  определяется по формуле:

$$P_H = P_T + P_{II} \pm G, \quad (4.3)$$

где  $P_T$  – сила трения;  $P_{II}$  – сила инерции,  $P_{II} = m_p d^2x/dt^2$ .

Время работы пневмоцилиндра складывается из времени прямого хода  $t_{ПХ}$ , времени выстоя  $t_B$  и времени обратного хода  $t_{ОХ}$ . Время прямого хода складывается из времени  $t_1$  срабатывания распределителя, распространения воздуха до цилиндра и времени нарастания давления  $p_1$ , времени  $t_1$  движения поршня по пути  $S$  и времени  $t_3$  в течении которого давление  $p_1$  нарастает до рабочего давления в сети  $p_c$ .

Время выстоя  $t_B$  зависит от характера технологического процесса. Время обратного хода поршня состоит из аналогичных периодов, обратных  $t_1, t_2$  и  $t_3$ . Суммарное время работы определяет быстрдействие работы ПР для каждой степени подвижности.

Расход воздуха (несжатого) для практических расчетов с учетом турбулентности его течения для политропического процесса  $pV^n = const$  ( $n$  – показатель политропы, для воздуха  $n = 1,4$ ) можно определить по формуле:

$$Q = \mu f_1 p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_2} \frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)} \quad (4.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода, определяемый отношением реальной скорости истечения к теоретической (справочн. в зависимости от стандартной формы местных сужений);  $p_1$  и  $p_2$  – давления воздуха в полостях нагнетания и опорожнения соответственно;  $R$  – газовая постоянная (для воздуха  $R = 287,14$  Дж/кг·К);  $T_2$  – температура в полости опорожнения;  $f_1$  – площадь входного сечения.

Критическое значение отношения  $p_2/p_1$ , которого стремятся добиться для увеличения скорости выходного звена, равно 0,529. Этого значения

добиваются путем уменьшения давления воздуха на выходе, при этом общий расход воздуха практически не изменяется.

**Демпфирование пневмопривода.** Из-за высоких скоростей движения поршня пневмодвигателя необходимо осуществлять его торможение в конце прямого и обратного хода. Это повышает точность позиционирования и снижает динамические нагрузки в ПР.

В пневмоприводах ПР используются два типа торможения: с помощью демпфирующих устройств или путем дросселирования (рис.4.2). При использовании демпфирующих устройств (внешних) торможение происходит на небольшом участке в конце хода при подходе к точке позиционирования. При использовании дросселей (торможение рабочим телом) разгон и торможение осуществляется на большей части хода, чем достигается требуемый закон изменения кинематических параметров в течение всего цикла движения.

*Торможение демпфером* основано на гашении энергии движения. Гидравлические демпферы (рис. 4.3) получили более широкое применение в сравнении с механическими.

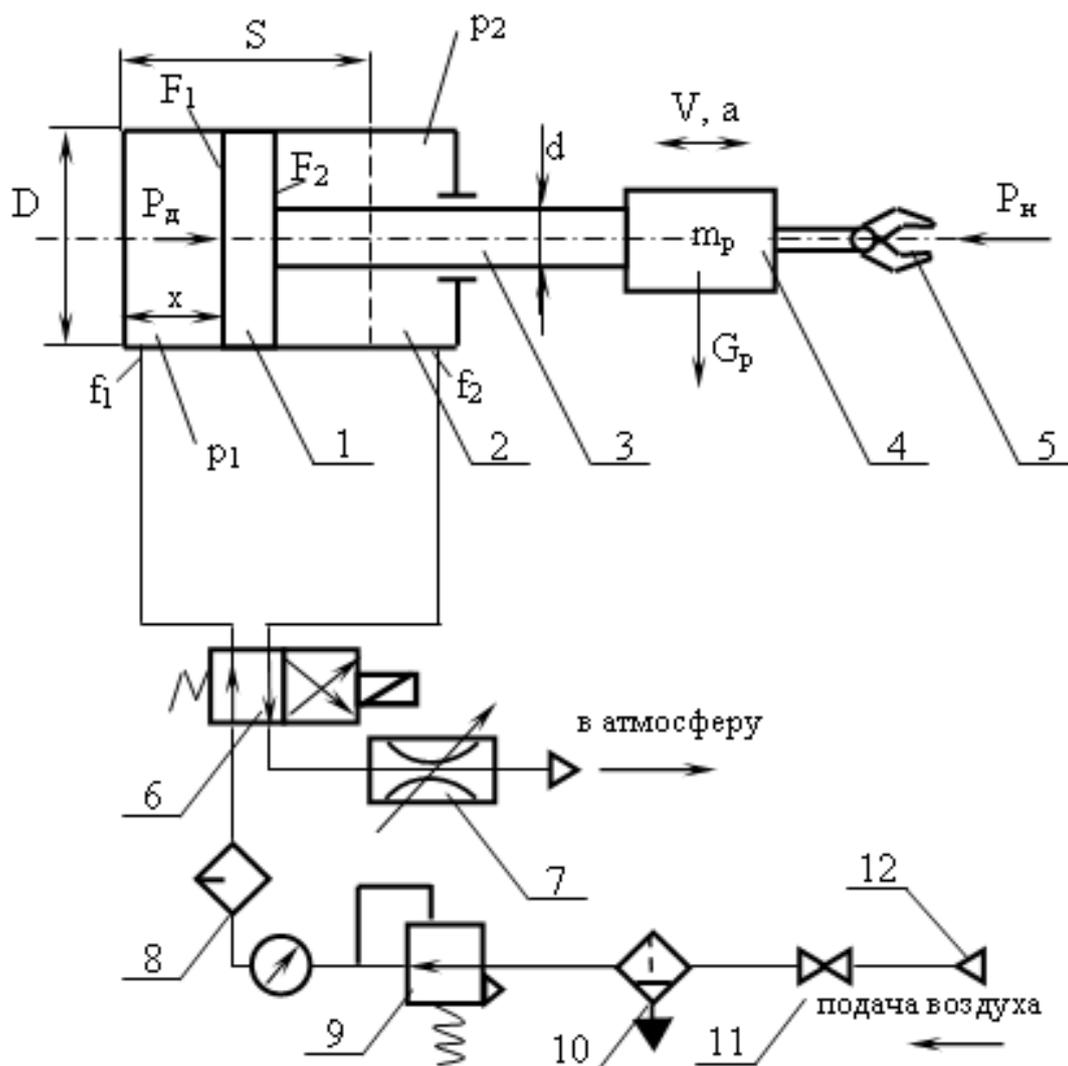


Рис. 4.3.

Работа гидродемпфера происходит следующим образом. В момент торможения упор 1, взаимодействующий со штоком пневмодвигателя, утопляет подвижную часть демпфера – поршень 2 гидроцилиндра 3. За счет вытеснения масла через коническую щель 4 в полость 5 и происходит торможение поршня 2. Плавность торможения обеспечивается за счет выбора параметров демпфера: размеров конической щели 4, параметров дросселя 8 и пружины 7 аккумулятора 6. Размеры  $d_0$ ,  $b$  и  $l$  рассчитывают по известной скорости поршня и допускаемому тормозному ходу.

Сила демпфирования  $P_D$  может быть определена по формуле:

$$D_{\dot{A}} = \Delta \dot{\delta}_\zeta \frac{\pi d_i^2}{4}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta p_\zeta$  – перепад давления в кольцевом зазоре  $z$ ;  $d_n$  – диаметр поршня демпфера.

Перепад давления  $\Delta p_\zeta$  определяется по формуле:

$$\Delta \dot{\delta}_\zeta = \frac{12 \mu b}{z^2} v_\zeta \quad (4.6)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $b$  – длина демпфирующего зазора;  $v_\zeta$  – скорость жидкости в зазоре.

Из условия неразрывности потока жидкости имеем:

$$v \frac{\pi d_i^2}{4} = v_\zeta f_\zeta \quad (4.7)$$

где  $v$  – скорость поршня исполнительного двигателя;  $f_\zeta$  – площадь зазора.

Тогда окончательно получаем:

$$P_D = \frac{12 \mu v}{z^3} \left( \frac{\pi d_n^2}{4} \right)^2 \quad (4.8)$$

В механических демпферах энергия движущихся элементов привода и груза преобразуется в энергию сжатой пружины. Конструктивное оформление механического демпфера производится в виде цилиндрической пружины, заключенной в корпус. Пружинные демпферы применяются для приводов с грузоподъемностью до 1 кг., поскольку параметры пружины зависят от массы перемещаемых объектов манипулирования, а также от скорости. Основным параметром пружины является сила пружины  $P_{ПР} = П_D$ .

Торможение поршня с использованием рабочего тела достигается путем уменьшения расхода воздуха из полости опорожнения за счет установки специального дросселя (поз.7 рис. 4.3) и позволяет изменять площадь выходного сечения  $f_2$  по закону  $f_2 = f(x)$ . При этом меняется значение давления и формируется необходимый закон движения поршня, т.е. регулируется скорость его перемещения. Такой способ торможения возможен только благодаря высокой сжимаемости воздуха и используется для роботов с грузоподъемностью до 5 кг.

Другим способом торможения является способ создания противодействия в соответствующей полости двигателя. При достижении поршнем некоторого положения в полость опорожнения подается основное давление

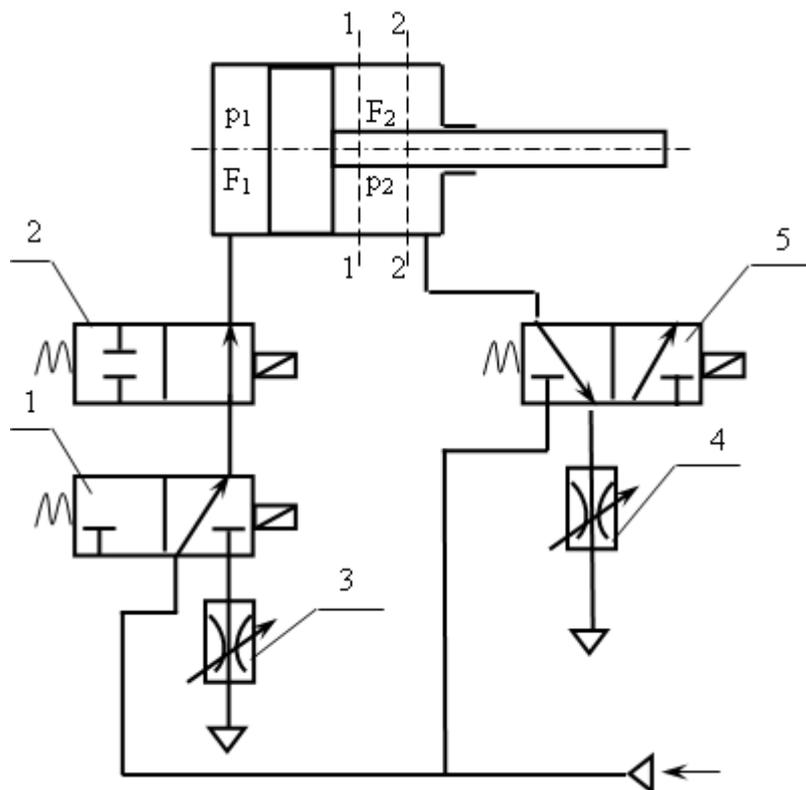


Рис. 4.4.

магистрали (рис. 4.4).

Работа происходит следующим образом. Сжатый воздух из магистрали питания через пневмораспределители 1 и 2 поступает в левую полость цилиндра. Правая полость через пневмораспределитель 5 и дроссель 4 сообщена с атмосферой. Поршень движется из левого положения в правое, при этом перепад давления на

поршне  $\Delta p = p_1 - p_2$ . По достижении поршнем положения 1-1 посредством системы управления ПР пневмораспределитель 5 переключается в другое положение (влево) и сжатый воздух из магистрали питания попадает в правую полость пневмоцилиндра. Давление в обеих полостях начинает выравниваться до  $p_1 = p_2$ . Из-за разности площадей левой и правой частей поршня  $F_1$  и  $F_2$  на поршень действует сила  $P = p_1 (F_1 - F_2)$ , под действием которой поршень будет двигаться с меньшей скоростью.

Для создания равновесия сил на поршне пневмораспределитель 2 должен переключиться одновременно с пневмораспределителем 5 и перекрыть доступ сжатого воздуха в левую полость цилиндра, которая будет представлять собой замкнутый объем  $V$ , для которого можно принять  $pV = const$ .

В случае равновесия на поршне:

$$p_1 F_1 = p_2 F_2 + N_{\hat{a}i}, \quad (4.9)$$

где  $N_{\text{вн}}$  – внешние силы (функциональное назначение).

Выражая площадь через диаметры, получаем условие, характеризующее равновесие в полостях цилиндра через соотношение давлений:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = 1 - \frac{d^2}{D^2} \quad (\text{при } N_{\text{вн}} = 0), \quad (4.10)$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры поршня и штока соответственно.

Иначе последнюю формулу можно переписать в виде:

$$\frac{X_{1f}}{X_1} = 1 - \frac{d^2}{D^2}, \quad (4.11)$$

где  $X_{1H}$  и  $X_1$  – начальная и конечная координата поршня.

Данная формула получена из следующего выражения с учетом  $pV = const$ :

$$\frac{p_{1H}}{p_1} = \frac{V_1}{V_{1H}} = \frac{F_1 X_1}{F_1 X_{1H}} = \frac{X_1}{X_{1H}}, \quad (4.12)$$

где  $V_{1H}$  и  $V_1$  – начальный и конечный объем левой полости.

В реальных конструкциях  $d / D = 0,3 \dots 0,7$ . В этом случае  $X_1 = (1,1 \dots 2)X_{1H}$ . Тогда очевидно, что после подачи сигнала на останов (после переключение влево пневмораспределителя 5 влево) перемещение поршня может составлять от 10 до 100% от начального положения  $X_{1H}$ .

Приведенные зависимости не отражают полностью реальные условия эксплуатации, т.к. не учитывают сил инерции и пр. и показывают качественную картину происходящих процессов при торможении поршня противодавлением (учет сил инерции важен и обязателен во всех проектировочных, прочностных и иных расчетах).

Рассмотренный метод торможения рабочим телом не является единственным. Существует множество других схем, но общим недостатком их

является перенастройка демпфирования при изменении условий и характера внешней нагрузки.

Данный метод демпфирования применяется для роботов с грузоподъемностью до 1 кг.

**Позиционирование пневмопривода.** Позиционирование выходного звена (например, УЗ) в ПР с цикловым управлением обеспечивается по двум крайним точкам и составляет  $\pm x_{\max}$ ;  $\pm \varphi_{\max}$  – максимальный и минимальный ход поршня при линейном и угловом перемещении. В некоторых случаях требуется позиционирование выходного звена в промежуточных точках. В этом случае позиционирование осуществляется при помощи внешних механических упоров с демпфированием при подходе к каждому упору (к точке). Расчеты и практика показывают, что таких точек позиционирования в пневмоприводах может быть 6...9 и не более, вследствие высокой сжимаемости рабочего тела (воздуха) и скорости перемещения.

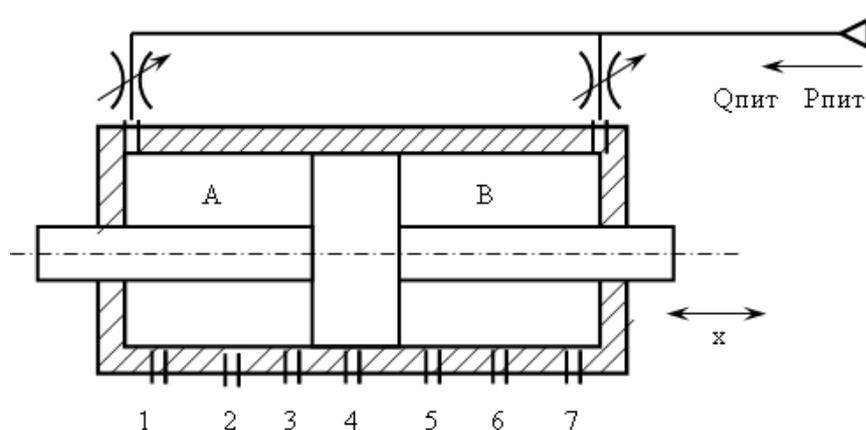


Рис. 4.5.

Число точек позиционирования можно увеличить, если использовать т.н. позиционеры. Наиболее простая схема позиционирования представлена на рис. 4.5.

Пневмодвигатель выполнен в виде цилиндра с ложным штоком двустороннего действия. Питание подводится в обе полости одновременно. При равенстве давлений в полостях поршень находится в покое.

Магистраль 1...7 служат для выхода воздуха в атмосферу. При открытии по команде системы управления одного из выходов давление в соответствующей полости понижается.

Под действием разности сил поршень будет двигаться до тех пор, пока не перекроется выход и давления в полостях A и B не выровняются. Закрывание и открытие выхода может осуществляться механическим путем или пневмораспределителем. Механически выход закрывается самим поршнем.

Другим способом позиционирования служит применение механического тормоза, который служит для останова выходного звена. Торможе-

ние осуществляют в два этапа, на первом – уменьшается скорость выходного звена на 5...10 % от максимальной.

Здесь с помощью датчиков положения определяются точки торможения, в которых дальнейшее движение выходного звена начинает замедляться. На втором этапе происходит останов выходного звена в заданной точке с помощью тормоза. Позиционное управление в пневмоприводах ПР применяется для широкого диапазона грузоподъемности от 0,1 до 20 кг. и скоростей от 500 до 1000 мм/с.

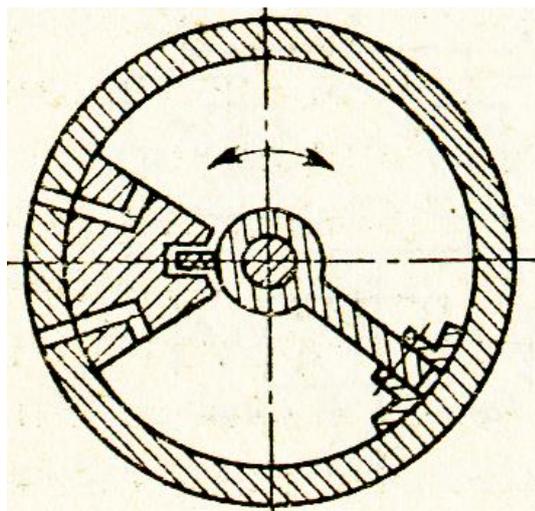


Рис. 4.6.

Иногда пневмоцилиндры приводов ПР не являются самостоятельными, цилиндрические полости растачиваются в корпусных деталях. Реже используются поворотные лопастные пневмодвигатели. Конструктивная схема такого двигателя изображена на рис. 4.6. При подаче давления в одну из полостей лопасть поворачивается вместе с валом. Максимальный угол поворота обычно составляет примерно 300°. Уплотнения устанавливаются у

вала и по периметру лопасти. Обычно надежность и долговечность этих уплотнений ниже, чем у пневмоцилиндров.

#### 4.2.2. Гидравлический привод ПР

Область применения гидродвигателей для привода ПР достаточно высока и заключается в 30% серийно выпускаемых средних и тяжелых ПР. Погрешность позиционирования в этих приводах довольно мала и не превышает  $\pm 0,5$  мм при скорости линейного перемещения до 0,8...1200 мм/с. Гидродвигатели в ПР применяются, как правило, для переносных степеней подвижности.

Достоинства гидроприводов:

- высокая энергоемкость;
- быстрое действие;
- малая инерционность;
- малая сжимаемость рабочей жидкости, т.е. высокая жесткость статических нагрузочных характеристик;
- возможность реализации автоматического управления и регулирования скорости исполнительных механизмов;

- надежность работы.
- Недостатки гидроприводов:
- сложность конструкции;
  - высокая стоимость изготовления и эксплуатации;
  - утечки и необходимость охлаждения рабочей жидкости.

В гидроприводах ПР применяют:

- линейные гидроцилиндры с поступательным движением штока;
- поворотные гидродвигатели с ограниченным углом поворота;
- гидромоторы.

Все элементы приводов стандартизованы и имеются в справочной

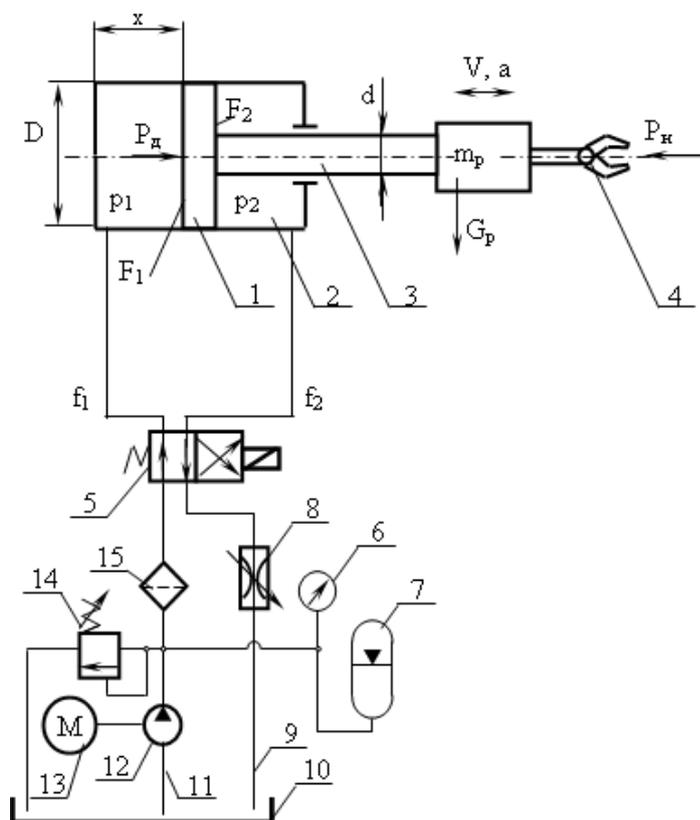


Рис. 4.7.

литературе. **Гидродвигатель** ПР (рис. 4.7) содержит поршень 1, цилиндр двустороннего действия 2, шток 3 с рукой и захватным устройством 4. Подача и отвод масла выполняется гидрозолотником 5. В состав гидродвигателя также входят манометр 6, аккумулятор 7, дроссель 8 (регулируется скорость перемещения выходного звена – руки ПР), сливной трубопровод 9 и бак 10, а также заборный трубопровод 11, гидронасос 12, электродвигатель 13, предохранительный клапан 14 и

фильтр 15. К числу основных параметров гидродвигателя относятся: эффективные площади поршня в рабочей  $F_1$  и сливной  $F_2$  полостях; ход поршня  $S$ ; текущая координата  $x$ ; скорость  $V$  и ускорение поршня  $a$ ; масса  $m_p$  руки ПР; давление масла в рабочей  $p_1$  и сливной  $p_2$  полостях; эффективные площади сечений трубопроводов в рабочей  $f_1$  и сливной  $f_2$  магистралях; диаметры поршня  $D$  и штока  $d$ ; движущая сила  $P_D$  и сила нагрузки  $P_H$ . Сила нагрузки определяется аналогично пневмодвигателю по формуле:

$$D_i = D_\delta + D_e \pm G, \quad (4.13)$$

где  $P_m$  – суммарная сила трения в направляющих;  $P_u$  – сила инерции,  $P_H =$

$m_p d^2x/dt^2$ ;  $G$  – вес всех подвижных частей, если цилиндр расположен вертикально. Знак «+» при опускании поршня, знак «-» – при подъеме.

Движущая сила – это сумма сил сопротивления и нагрузки:

$$D_{\ddot{a}} = D_i + D_n, \quad (4.14)$$

где  $P_c$  – сила сопротивления масла в сливной магистрали, определяется произведением давления масла и площади поршня в сливной полости гидроцилиндра:  $D_n = \delta_2 F_2$ .

Выбор основных параметров гидродвигателя, по которым может производиться окончательный подбор марки и модели ПР, производится следующим образом.

**При движении поршня вправо.** Размеры цилиндра ПР связаны эмпирической зависимостью:

$$F_1 = D^2 / 127, \quad F_2 = (D^2 - d^2) / 127 \quad (4.15)$$

Размеры  $D$  и  $d$  подставляются в мм., а  $F_1$  и  $F_2$  получаются в см<sup>2</sup>.

Движущая сила определяется по формуле:

$$P_{\delta} = 100k_m (p_1 F_1 - p_2 F_2) \quad , \quad (4.16)$$

где  $k_m$  – коэффициент, учитывающий потери на трение,  $k_m = 0,9 \dots 0,98$ .

$P_{\delta}$  подставляется в ньютонах,  $p$  – в мегапаскалях.

Расход масла и скорость поршня связаны зависимостями:

$$Q_2 = V_1 (D^2 - d^2) / 1270 \quad (4.17)$$

$$Q_1 = V_1 D^2 / 1270 \quad ,$$

где  $Q$  – расход, л/мин;  $V$  – скорость, м/мин.

**При движении поршня влево:**

$$P_{\delta} = 100k_m (p_1 F_1 - p_2 F_2); \quad (4.18)$$

$$Q_2 = V_2 (D^2 - d^2) / 1270 ; \quad (4.19)$$

$$Q_1 = V_2 D^2 / 1270 \quad . \quad (4.20)$$

При заданном соотношении скоростей  $V_1$  и  $V_2$  (когда  $V_1 < V_2$  и количе-

ство поступающего в цилиндр масла = const) диаметр штока находят из выражения:

$$d = D\sqrt{1 - (V_1/V_2)}, \quad (4.21)$$

где  $D$  и  $d$  – в мм, а  $V_1$  и  $V_2$  – в м/мин.

Диаметр поршня  $D$  и его длину  $L$  выбирают из условий компоновки узла ПР. Обычно рекомендуется  $L/D = 18...20$ , а для больших перемещений  $L/D \gg 18...20$ .

Параметры поворотного лопастного двигателя выбирают на основе следующих соотношений.

Движущий момент (в Нм) на выходном валу:

$$M_{\partial} = (p_1 - p_2) / [8000(D^2 - d^2)b], \quad (4.22)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление в напорной и сливной полостях, МПа;  $b$  – ширина лопасти, мм;  $D$  и  $d$  – размеры гидродвигателя.

Угловая скорость (рад/с) поворота выходного вала:

$$\omega = (1,33 \times 10^5 Q) / [(D^2 - d^2)b], \quad (4.23)$$

где  $Q$  – расход масла, л/мин.

Параметры гидромотора выбирают на основе следующих соотношений. Движущий момент на выходном валу:

$$\dot{I}_{\dot{A}} = q(\delta_1 - \delta_2) / 2\pi, \quad (4.24)$$

где  $q$  – рабочий объем гидромотора, см<sup>3</sup>;  $p_1$  и  $p_2$  – давление в напорной и сливной магистралях, МПа.

Частота вращения выходного вала (мин<sup>-1</sup>):

$$n = (1000Q) / q, \quad (4.25)$$

где  $Q$  – расход масла, л/мин.

Известны электрогидравлические приводы ПР двух классов: **дрессельного управления** и **объемного управления**. Дроссельное управление различается как управление с гидронасосом *постоянной производительности* и *переменной производительности*. Во всех случаях может происходить управление либо гидроцилиндром, либо гидромотором.

Гидронасос постоянной производительности значительно дешевле, чем насос переменной производительности, однако энергетические характеристики привода дроссельного регулирования с насосом постоянной производительности хуже из-за больших непроизводительных потерь. Происходит обратный слив части жидкости и превращение части потенциальной энергии в тепловую, требуется охлаждение. Этих недостатков нет у привода дрос-

сельного управления с насосом переменной производительности.

В связи с этим гидроприводы дроссельного управления с насосом постоянной производительности применяются в роботах меньшей грузоподъемности (десятки кг), а с насосом переменной производительности – в основном для роботов большой и сверхбольшой грузоподъемности (сотни кг).

Схема гидравлического привода дроссельного управления с насосом переменной производительности показана на рис. 4.8.

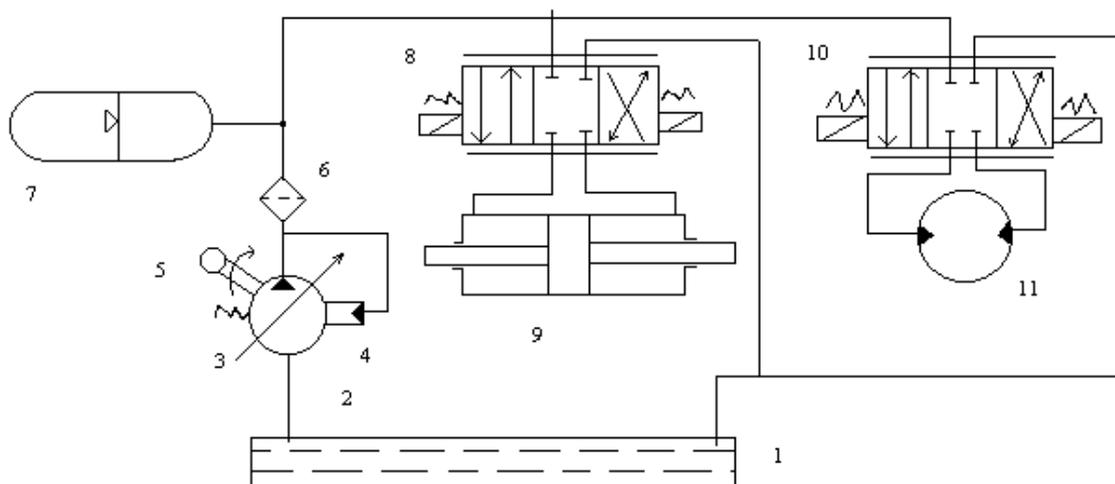


Рис. 4.8.

Рабочая жидкость забирается насосом из бака 1 через фильтр 2 с помощью насоса 3. Там имеется электродвигатель 5 и регулятор подачи насоса 4. Затем рабочая жидкость проходит фильтр тонкой очистки 6. Пневмогидравлический аккумулятор 7 служит для стабилизации давления в нагнетающей магистрали при резких его изменениях.

Гидродвигатель состоит из золотникового распределителя (8, 10) и силового цилиндра 9 или гидромотора 11. Дросселирование потоков рабочей жидкости достигается путем изменения проходных сечений золотникового распределителя. Проходное сечение зависит от положения кромки золотника относительно проточки золотниковой втулки. Величиной проходного сечения, т.е. смещением золотника, определяется скорость перемещения гидродвигателя. Для улучшения характеристик этого привода применяют приводы с пропорционально-дроссельным регулированием.

В ПР применяются также электрогидравлические приводы объемного регулирования (рис. 4.9), которые имеют лучшие энергетические и нагрузочные характеристики, чем окупаются их более высокая стоимость. Такие приводы перспективны в основном для роботов большой и сверхбольшой грузоподъемности.

В этих приводах положение и скорость подвижной части гидропри-

вода 9 или силового гидроцилиндра 10 регулируются не дроссельными золотниковыми устройствами, а с помощью изменения подачи гидронасоса 5 (с электромотором 4) по соответствующим командам управления. При этом насос 5 обладает реверсированием. Подача этого гидронасоса управляется микрогидроприводом дроссельного управления 6, питаемого через фильтр 3 гидронасосом постоянной подачи 2 из емкости рабочей жидкости 1. Насосом 2 производится подпитка всей системы через клапаны 7.

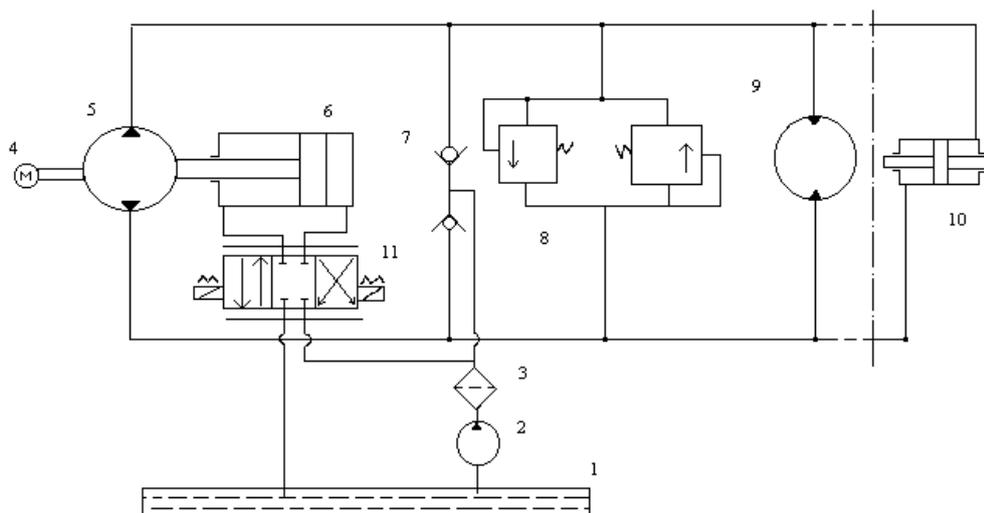


Рис. 4.9.

Та-  
ким обра-  
зом, здесь  
имеется ма-  
гистраль  
низкого  
давления  
для двига-  
телей 9 и  
10. Предо-  
хранитель-  
ные клапа-  
ны 8 слу-  
жат

для исключения больших случайных перегрузок в магистрали. Важно отметить, что каждый гидродвигатель 9 и 10 имеет свою отдельную регулируемую систему, включающую в себя насос переменной производительности 5 с микроприводом дроссельного управления 6.

Расход жидкости в гидроцилиндре определяют как произведение скорости перемещения штока  $V$  на площадь поршня  $S$  ( $Q = VS$ ), для предотвращения вибраций штока его длина  $l$  не должна превышать 18...20 диаметров поршня. Направление движения поршня зависит от того, в штоковую или поршневую полость подается рабочая жидкость. Усилие  $F$  на штоке зависит от разности давлений в поршневой  $P_1$  и штоковой  $P_2$  полостях:

$$F = SP_1 - (S-s)P_2, \text{ где } S - \text{площадь поршня, } s - \text{площадь штока.}$$

При одинаковом давлении в обеих полостях поршень гидроцилиндра будет двигаться вправо, вытесняя рабочую жидкость из штоковой полости, поскольку площадь сечения поршня больше разности площадей сечений поршня и штока.

В промышленных роботах используются также неполноповоротные лопастные гидродвигатели с диапазоном угла поворота, например до  $270^\circ$ ,

конструкция которых аналогична лопастным пневмодвигателям (рис. 4.6). Они способны вести звено манипулятора без промежуточных передач.

### 4.2.3. Электрический привод ПР

Особенности электроприводов ПР:

- расширенный диапазон малых моментов (всего до 0,05 Нм);
- повышенная частота вращения (до  $15 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ );
- пониженная инерция ЭД;
- возможность встраивания в ЭД электромагнитных тормозов, датчиков, механических и волновых передач.

Достоинства электропривода ПР:

- высокая точность срабатывания, что обеспечено применением цифровой измерительной системы и высокоточных импульсных датчиков;
- компактная конструкция различных преобразователей;
- низкий уровень шума и вибрации и доступность электроэнергии.

Недостатки электроприводов ПР:

- ограниченное использование во взрывоопасных средах;
- зависимость скорости выходного звена от внешней, что требует создания дополнительных контуров регулирования привода;
- наличие дополнительной кинематической цепи между электродвигателем и рабочим органом ПР.

В новых ПР используют приводы с высокомоментными и бесколлекторными электродвигателями (ЭД) постоянного тока, силовыми шаговыми двигателями и асинхронными двигателями (рис. 4.10 – классификация электродвигателей).

Достоинства ЭД, применяемых в ПР:

- компактная конструкция ЭД;
- высокое быстродействие;
- равномерность вращения;
- высокий крутящий момент при максимальной скорости;
- высокая степень надежности;
- широкий диапазон регулирования по скорости, позиционированию и моментам нагрузки;
- возможность длительной работы в заторможенном режиме;
- взаимозаменяемость.

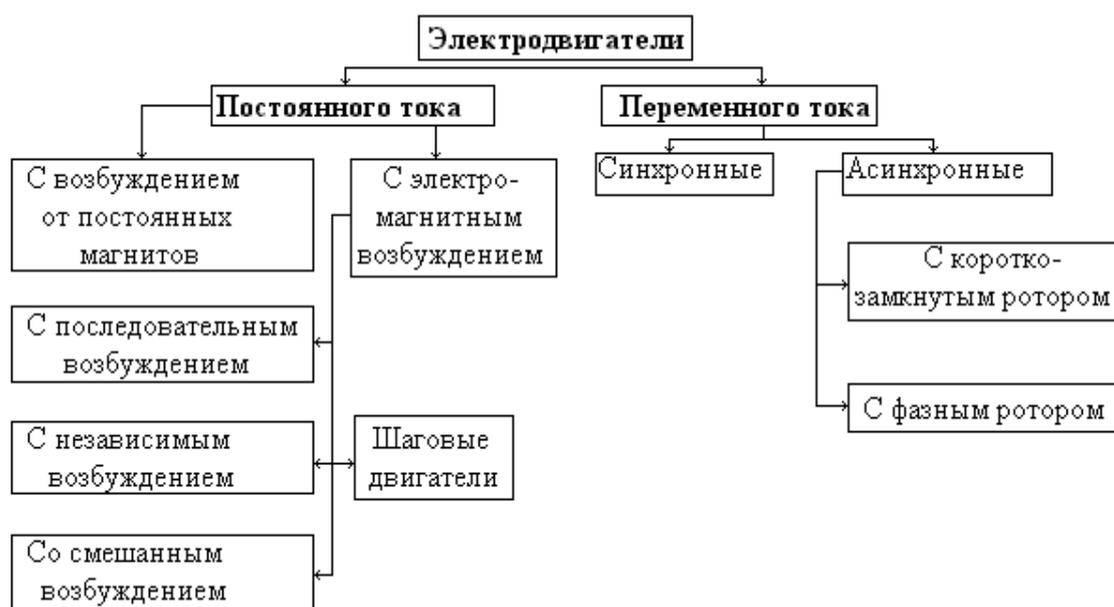


Рис. 4.10.

Схема и характеристики электрического двигателя с независимым возбуждением и управлением по напряжению якоря представлены на рис. 4.11, а для электродвигателя с независимым возбуждением и управлением по току возбуждения – на рис. 4.12. Из приведенных характеристик видна зависимость угловой скорости и момента от управляющих величин, соответственно напряжения в цепи якоря и тока в обмотке возбуждения.

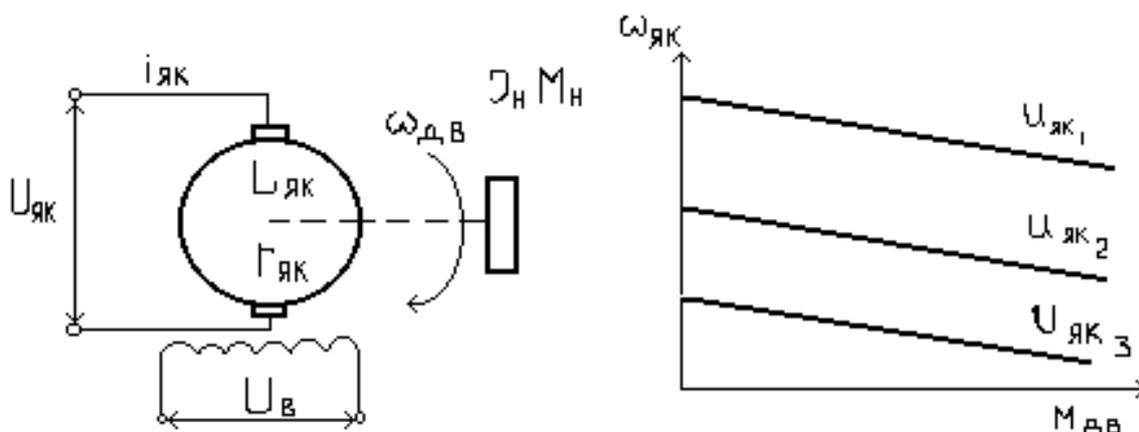


Рис. 4.11.

У двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 4.13) на вращающемся роторе (якоре) имеется обмотка, к которой подводится напряжение  $U_0$ . Вокруг обмотки образуется электромагнитное поле, кото-

рое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита на статоре.

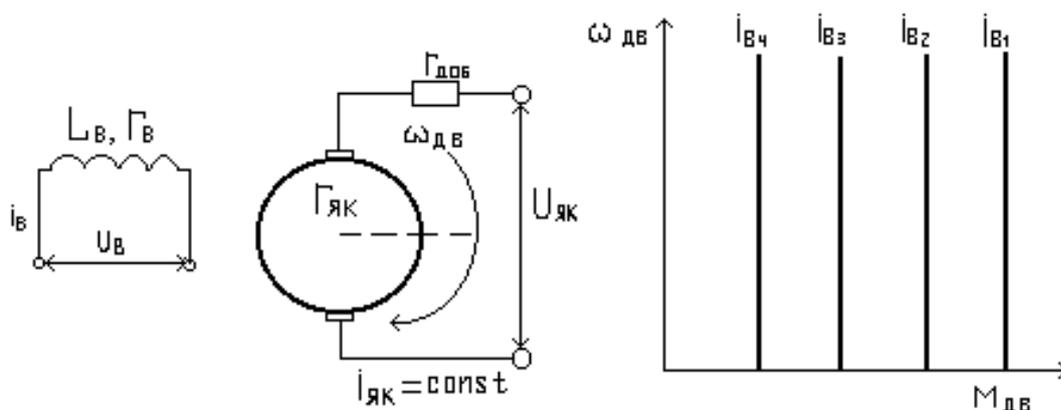


Рис. 4.12.

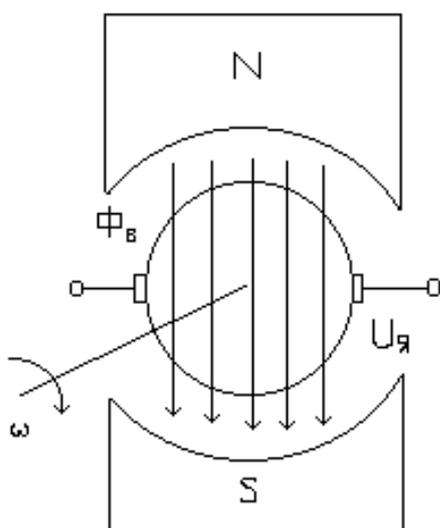


Рис. 4.13.

Ротор поворачивается так, чтобы его магнитный поток совпадал с направлением магнитного потока статора, по инерции проходит положение равновесия и начинает вращаться относительно статора.

Скорость вращения ЭД постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов регулируется путем изменения напряжения в цепи якоря при постоянном потоке возбуждения. Благодаря достаточно высокой коэрцитивной силе постоянных магнитов можно существенно

повышать мощность двигателя вплоть до создания высокомоментных двигателей. Это важно для применения их в робототехнике. Путем устройства полых или дисковых якорей можно значительно уменьшить инерционность двигателя и повысить его быстродействие.

Существуют различные принципы управления электродвигателями. Используют тиристорное управление с помощью вентильных (тиристорных) преобразователей. Тиристор представляет собой управляемый полупроводниковый диод. Применение вентильных преобразователей для управления скоростью и реверсом электродвигателей постоянного тока привело к созданию бесконтактных двигателей. Вместо коллектора со щетками применяется полупроводниковая схема.

Бесконтактными (или вентильными) двигателями постоянного тока

называются электрические машины, где функции коллектора и щеток выполняют полупроводниковые управляемые ключи. Они свободны от недостатков, присущих традиционным двигателям постоянного тока, которые обусловлены наличием щеточно-коллекторного узла. Преимущества вентильных двигателей:

- высокая надежность, большой срок службы, не требуется обслуживание при эксплуатации (т.к. нет коллекторного искрения и износа щеток, уменьшено трение и нагрузка на подшипники);
- улучшенные тепловые характеристики (отсутствуют тепловыделяющие элементы в роторе, поэтому тепло рассеивается только на обмотках статора), малые сечения проводов;
- высокое быстродействие за счет малого момента инерции ротора, стабильная частота вращения, которая не зависит от частоты напряжения питающей сети;
- широкий диапазон регулирования скорости, линейные механические и регулировочные характеристики, равномерное вращение на низких скоростях.

Бесконтактные двигатели постоянного тока состоят из трех основных элементов:

- электрической машины синхронного типа с  $m$ -фазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита;
- датчика положения ротора (ДПР), выполненного в одном корпусе с двигателем и предназначенного для выработки сигналов управления моментами времени и последовательностью коммутации токов в обмотках статора;
- электронного коммутатора, осуществляющего по сигналам ДПР коммутацию токов в обмотках ротора.

ДПР определяются чувствительными элементами, которые могут

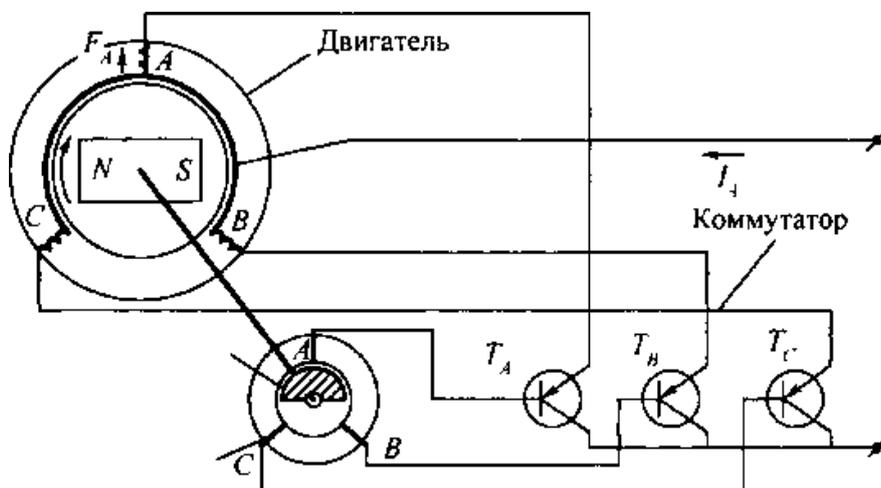


Рис. 4.14.

быть построены с использованием ЭДС Холла, фотоэффекта и т.д. Принцип действия такого двигателя показан на упрощенной схеме (рис. 4.14).

Двигатель имеет: три обмотки на статоре, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  и соединенные в звезду; ДПР с одним сигнальным элементом (СЭ) и тремя чувствительными элементами (ЧЭ) (их число равно числу обмоток статора); коммутатор, выполненный на трех транзисторах, работающих в ключевом режиме.

В положении ротора, показанном на рис. 4.15 (три такта в работе бесконтактного двигателя постоянного тока), сигнальный элемент через чувствительный элемент А открывает транзистор  $T_A$ . Намагничивающая сила (НС) обмотки  $F_A$  взаимодействует с потоком постоянного магнита ротора.

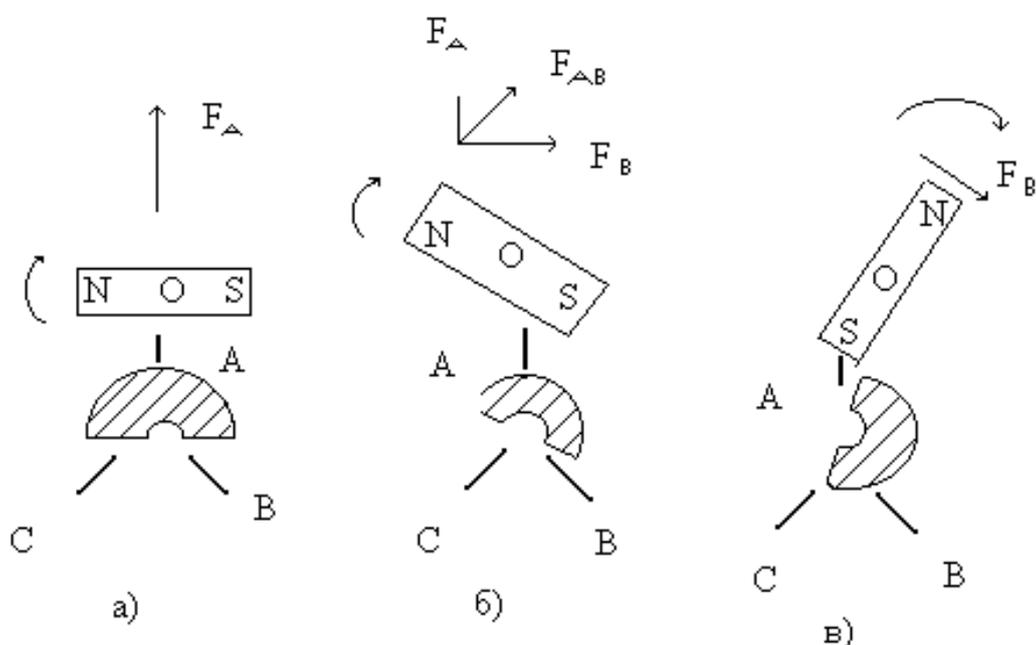


Рис. 4.15.

Возникает вращающий момент, и двигатель приходит во вращение (1-й такт на рис. 4.15а). Вместе с ротором поворачивается и сигнальный элемент ДПР. При повороте ротора на угол, чуть больший  $30^\circ$ , СЭ воздействует сразу на два чувствительных элемента А и В. В результате открываются два транзистора:  $T_A$  и  $T_B$ . Ток протекает по обеим обмоткам А и В и возникает результирующая сила  $F_{AB}$ , повернутая на  $60^\circ$  по сравнению с первым положением (2-й такт, рис. 4.15б).

Эта сила продолжает взаимодействовать с полем постоянного магнита и двигатель развивает вращающий момент. Когда угол поворота станет чуть больше  $90^\circ$ , транзистор  $T_A$  закроется и ток будет проходить только по обмотке В.

Поле ротора будет взаимодействовать только с НС этой обмотки, однако, вращающий момент по-прежнему будет вращать ротор двигателя в том же направлении (3-й такт, рис. 4.15в). В конечном итоге двигатель разовьет такую скорость, при которой его момент будет уравниваться моментом нагрузки.

Частоту вращения бесконтактных двигателей можно регулировать в широких пределах путем изменения амплитуды напряжения питания либо скважности (длительности импульсов) для широтно-импульсного метода управления.

Если бы бесконтактный двигатель имел столько же обмоток, ЧЭ и транзисторов, сколько обычный двигатель имеет коллекторных пластин, то по своим свойствам и характеристикам они ничем не отличались бы друг от друга. Однако увеличение числа элементов сильно усложняет конструкцию машины.

В реальных двигателях число обмоток, а соответственно и число ЧЭ и транзисторов не превышает 3...4. Малое число обмоток обуславливает ряд особенностей работы бесконтактного двигателя постоянного тока, вызванных скачкообразным перемещением НС статора. Это пульсация вращающего момента, пульсация токов в обмотках статора и суммарного тока двигателя, что объясняется дискретным питанием обмоток (в тот момент, когда открыта два транзистора, потребляемый ток вырастает в 2 раза по сравнению с режимом, когда открыт только один транзистор).

Тиристорное управление используется также и при управлении кол-

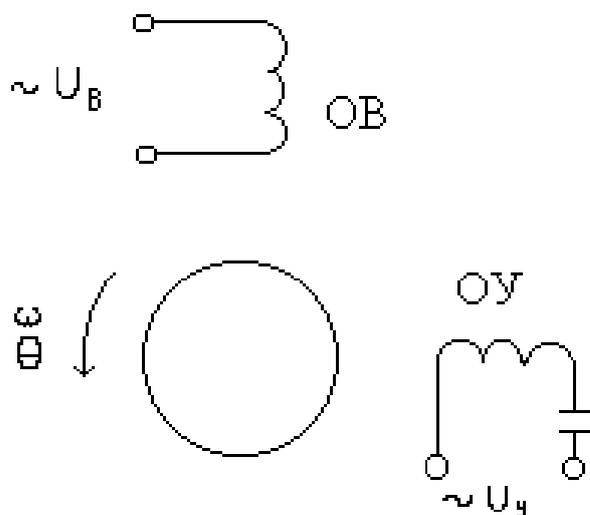


Рис. 4.16.

лекторными двигателями, где они также имеют преимущество перед другими способами управления. Перспективно применение в робототехнике электродвигателей переменного тока – асинхронных двухфазных (рис. 4.16) и трехфазных.

Обмотка возбуждения (ОВ) двухфазного асинхронного двигателя питается от сети переменного тока. В обмотку управления (ОУ) поступает из-

меняемое напряжение  $U_y$ . Оно имеет по отношению к  $U_B$  сдвиг по фазе на  $90^\circ$ . Асинхронные двигатели переменного тока, особенно трехфазные, имеют меньшую массу и габаритные размеры по сравнению с двигателями постоянного тока (при той же мощности) и обладают значительно большим ресурсом. Однако они применялись до сих пор в робототехнике редко ввиду трудностей построения схем управления в широком диапазоне, особенно при малых мощностях, распространенных в робототехнике. В настоящее время этот барьер также преодолевается.

Трехфазный электродвигатель имеет ротор с трехфазной обмоткой или короткозамкнутый ротор в виде «беличьего колеса». На статоре под углом  $120^\circ$  находятся три обмотки, одни концы которых соединены (если применяется схема «звезда»), а другие свободны. При подключении обмоток статора к источнику переменного трехфазного напряжения в статоре образуется вращающееся магнитное поле, которое заставляет вращаться ротор. У такого двигателя скорость мало изменяется при увеличении нагрузки, но после превышения некоторого значения двигатель останавливается («опрокидывается»). После этого начинают греться его обмотки.

Ротор синхронного двигателя выполнен в виде постоянного магнита, как у шагового двигателя, а на статоре размещены три обмотки, как у асинхронного двигателя. Скорость вращения синхронного двигателя зависит только от числа пар полюсов обмотки статора и частоты переменного напряжения.

Линейные двигатели переменного тока можно представить как электродвигатель вращения, у которого разрезали и развернули в линию статор с обмотками. При подключении напряжения в статоре образуется бегущее

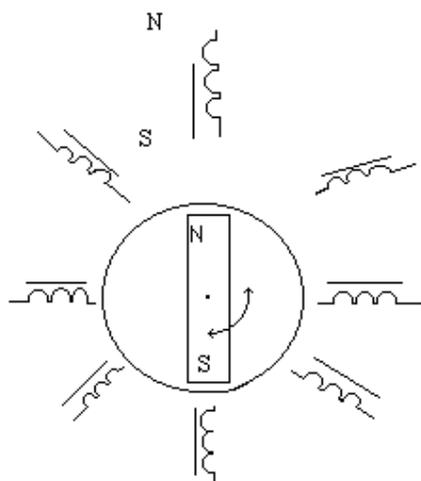


Рис. 4.17.

магнитное поле, заставляющее ротор двигаться вдоль статора. Скорость (до 1 м/с) изменяется также, как в обычных двигателях.

Шаговые электродвигатели также получили применение в приводах промышленных роботов. Ротор шагового двигателя выполнен в виде постоянного магнита (рис. 4.17). На статоре размещены десятки обмоток, к которым подключают постоянное напряжение разной полярности.

При подключении противоположных

обмоток к напряжению с разной полярностью к ним притягиваются противоположные полюса постоянного магнита и ротор поворачивается. Если число обмоток велико, то поворот ротора происходит с высокой точностью на угол, заданный сочетанием обмоток, к которым приложено напряжение. В приводе с шаговым двигателем нет необходимости в датчиках обратной связи, как во всех предыдущих, для регулирования положения. Шаговые двигатели весьма различны по конструкции и принципам управления.

Выше говорилось об электродвигателях, создающих вращательное движение. Существуют *линейные электродвигатели* различных конструкций, которые осуществляют поступательное перемещение. В последние годы появились многокоординатные приводы (в частности, двухкоординатные на плоскости), обладающие большой точностью позиционирования.

Электропривод современного ПР представляет собой комплекс приводов, каждый из которых управляет отдельной степенью подвижности. Рассмотрим на примере электроприводного ПР модели HdS05/06 (фирма GdA, Германия) наиболее распространенную функциональную схему (рис. 4.18).

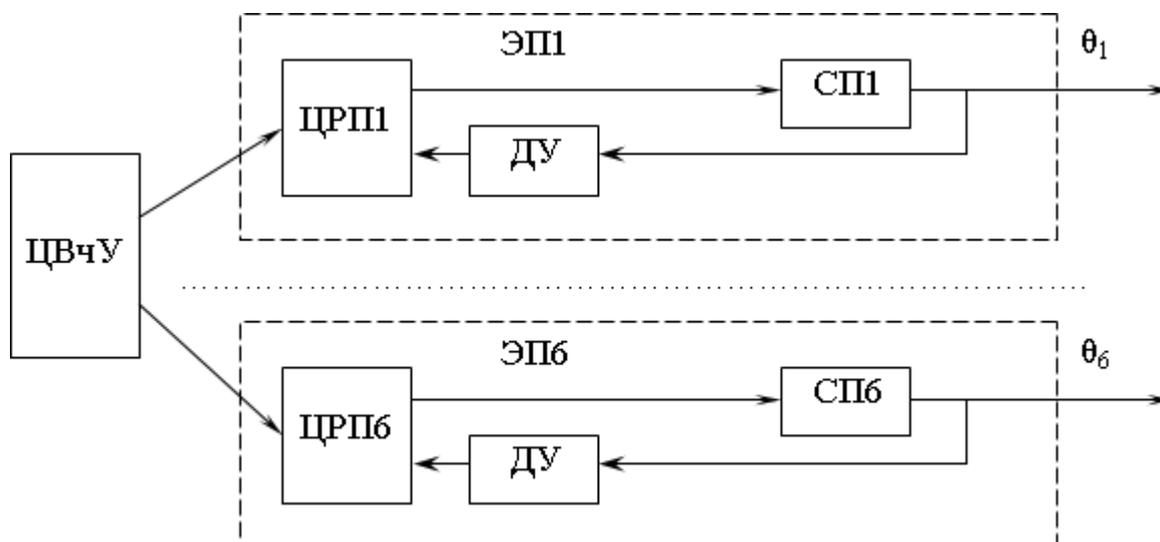


Рис. 4.18.

Этот ПР обладает шестью степенями подвижности, обозначенными на схеме как  $\theta_1 \dots \theta_6$ . Все шесть электроприводов (ЭП1...ЭП6) управляются от общего центрального вычислительного устройства (ЦВЧУ) системы программного управления (СПУ) ПР.

Центральное вычислительное устройство выдает сигналы на цифровые регуляторы положения (ЦРП1...ЦРП6) отдельных приводов. Циф-

ровые регуляторы положения управляют сервоприводами (СП1...СП6) в соответствии с сигналами ЦВЧУ и датчиков угла (ДУ), например, кодовых датчиков угла с фотоэлектрическим преобразованием.

Одним из наиболее сложных и ответственных элементов в электроприводном ПР является сервопривод (СП). Функциональная схема сервопривода ПР приведена на рис. 4.19.

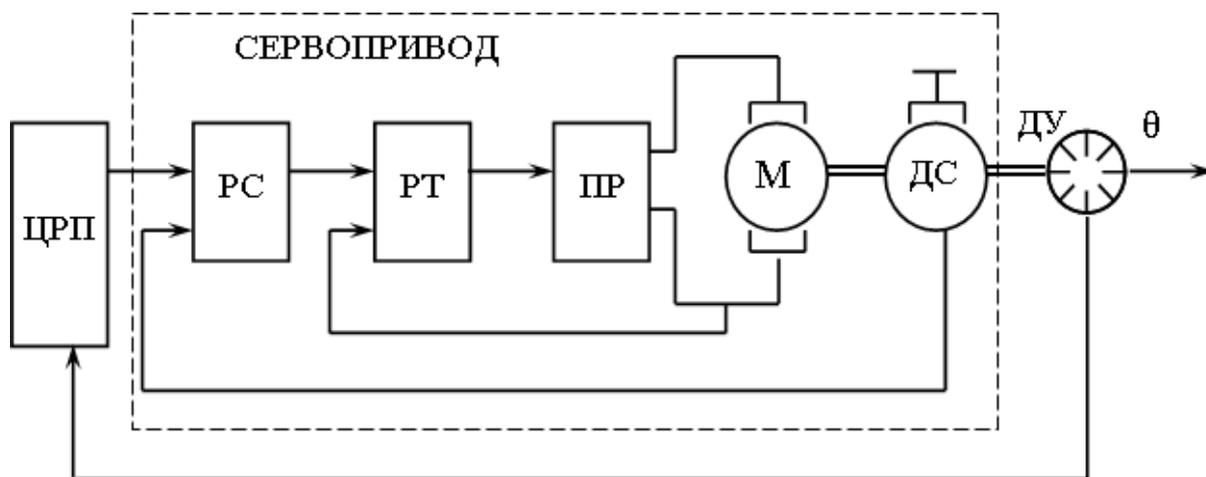


Рис. 4.19.

Схема представляет собой аналогово-цифровую систему автоматического управления, в которой сочетаются преимущества комбинированной аналоговой системы, работающей по принципу трехконтурной системы подчиненного регулирования, с достоинствами цифровой системы (высокая точность и удобство программирования).

Первый контур образован двигателем (М) с преобразователем (ПР) и регулятором тока (РТ). Во второй контур входят датчик скорости (ДС) и регулятор скорости (РС). В состав третьего контура дополнительно входят датчик угла (ДУ) и цифровой регулятор положения (ЦРП).

В качестве регуляторов скорости и тока в ПР чаще всего используются аналоговые, а в последнее время – и цифровые, операционные усилители с помощью которых легко реализуется практически любой требуемый закон управления. Датчик скорости также может быть как аналоговым, так и цифровым.

В ряде случаев применение датчика скорости не требуется, т.к. сигнал об изменении скорости может быть вычислен в цифровом регуляторе положения (ЦРП) путем дифференцирования сигнала с датчика угла (ДУ).

Таким образом анализ функциональных схем, приведенных на рис.

4.18 и рис. 4.19, показывает, что независимо от конкретной схемы электропривод ПР состоит из следующих элементов:

- исполнительного элемента (двигателя);
- преобразователя;
- регуляторов тока, скорости и угла;
- датчиков обратной связи по току, скорости и углу.

Современные тенденции развития робототехники таковы, что позволяют выпускать сервоприводы, которые объединяют двигатель, преобразователь, датчики и регуляторы скорости и тока.

#### 4.2.4. Комбинированные приводы ПР

Стремление максимально использовать и объединить достоинства отдельных типов приводов, а также скомпенсировать их недостатки привело к разработке и применению в роботах различных комбинированных приводов.

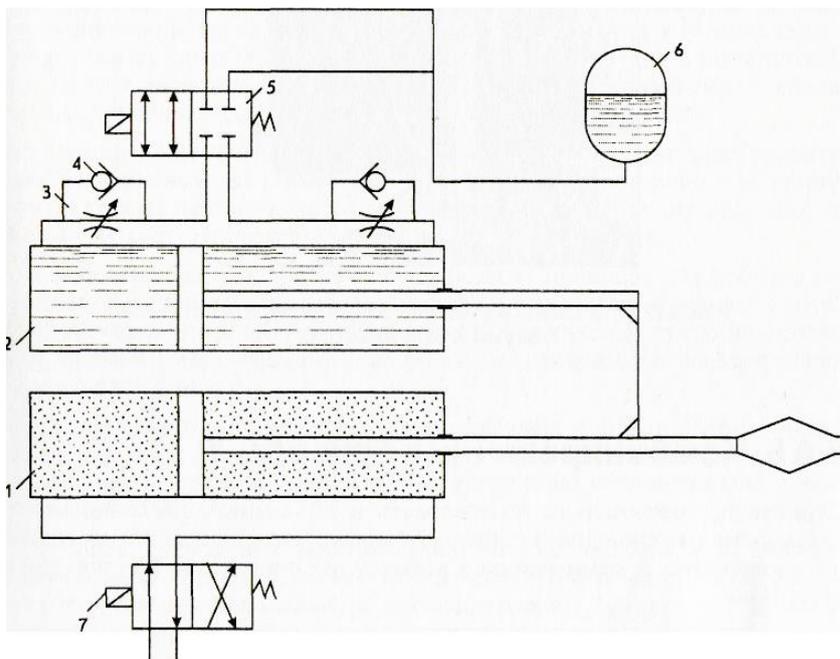


Рис. 4.20.

На рис. 4.20 показана схема комбинированного пневмогидравлического привода, в котором действующий параллельно основному исполнительному пневмоцилиндру 1 гидроцилиндр 2 обеспечивает коррекцию скорости выходного звена и его конечного положения.

ложения.

Воздух под давлением поступает из магистрали в одну из полостей пневмоцилиндра 1 через пневмораспределитель 7. В результате происходит перемещение поршня со штоком, скорость которого определяется настройкой гидродросселей 3. (При этом гидродросселем 5 находится в правом положении, соединяя обе полости гидроцилиндра.) Обратные клапаны 4 обеспечивают свободный доступ жидкости в заполняемую полость гидроцилиндра 2.

Для компенсации разности объемов полостей гидроцилиндра и пополнения утечек масла в схеме предусмотрен масляный аккумулятор 6. Гидрораспределитель 5 может выполнять роль гидрозамка, фиксирующего положение манипулятора. Если в качестве дросселей 3 применены дроссели с пропорциональным электрическим управлением, то рассматриваемый привод при наличии обратной связи по положению можно использовать в работах с позиционным управлением. Существуют аналогичные пневмоэлектрические приводы, в которых вместо гидропривода применен электропривод.

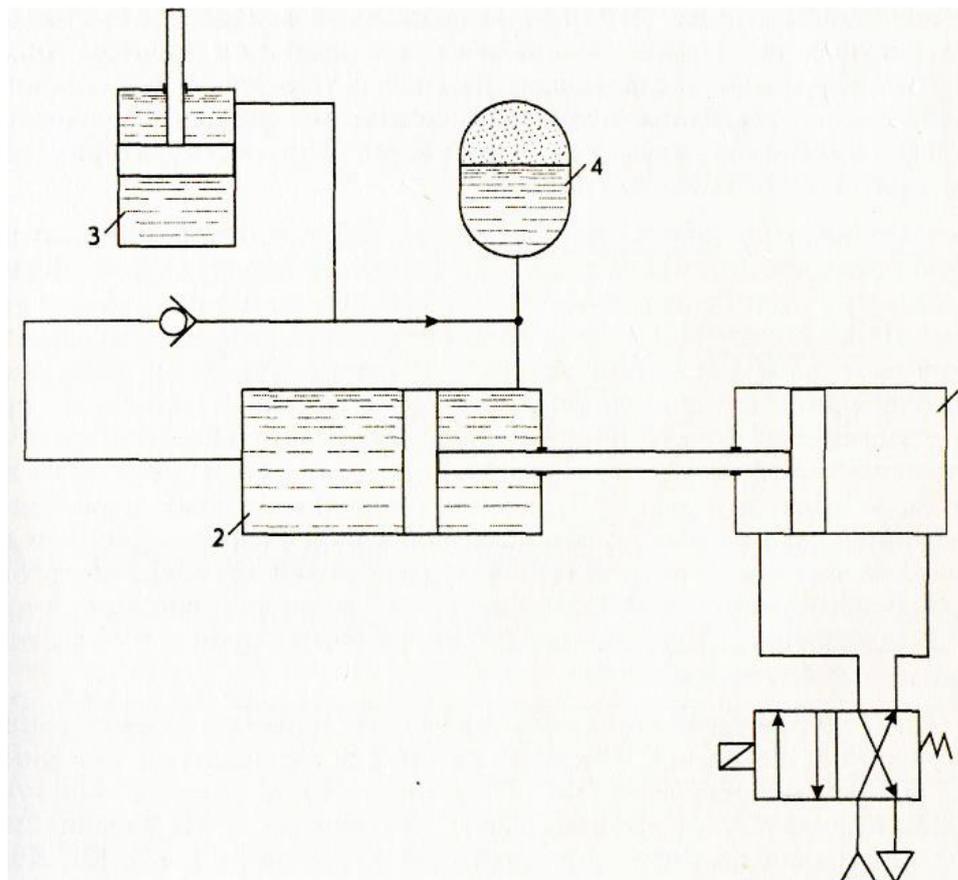


Рис. 4.21.

На рис. 4.21 приведена принципиальная схема гидропневматического привода. Введение здесь пневмоцилиндра 1 перед основным исполнительным гидроцилиндром позволяет отказаться от гидронасосной станции. При подаче воздуха в поршневую полость пневмоцилиндра 1 создается давление в поршневой полости гидроцилиндра 2 и жидкость из нее поступает в исполнительный гидроцилиндр 3.

В результате поршень его перемещается. При движении поршня пневмоцилиндра в обратном направлении соответственно изменяется направление движения поршней в гидроцилиндрах 2 и 3. Емкость 4 служит для компенсации разности объемов полостей цилиндра, а также утечки жидкости.

Широкое применение нашли комбинированные гидроэлектрические приводы, в которых последовательно соединены маломощный электрический и выходной гидравлический приводы. Электропривод преобразует входной электрический сигнал в перемещение, которое служит входным управляющим воздействием для гидроусилителя гидропривода. Электрический привод может быть замкнутым следящим или разомкнутым на базе шагового двигателя.

#### 4.2.5. Микроприводы ПР

Для манипулирования миниатюрными изделиями применяются новые типы двигателей – прецизионные высокочастотные вибродвигатели (рис. 4.22). По принципу действия они являются пьезоэлектрическими двигателями. Существует много их разновидностей как для поступательных, так и для вращательных перемещений с микронными точностями и с большим диапазоном регулирования скорости. Вибродвигатели основаны на преобразовании высокочастотных упругих колебаний звеньев в виде стоячих или бегущих волн. Преобразуемые колебания имеют частоты с малыми амплитудами в ультразвуковом диапазоне.

Такие вибродвигатели могут иметь несколько степеней подвижности для твердых звеньев. Если применить эластичные звенья из пьезоактивных материалов, то можно получить гибко деформирующиеся манипуляторы. К подвижному звену 4 (рис. 4.22) с помощью упругих элементов 2 и 3 (жесткость  $c_1 > c_2$ ) прижат вибропреобразователь 7. Он подключен к блоку 5, являющемуся генератором электрических колебаний.

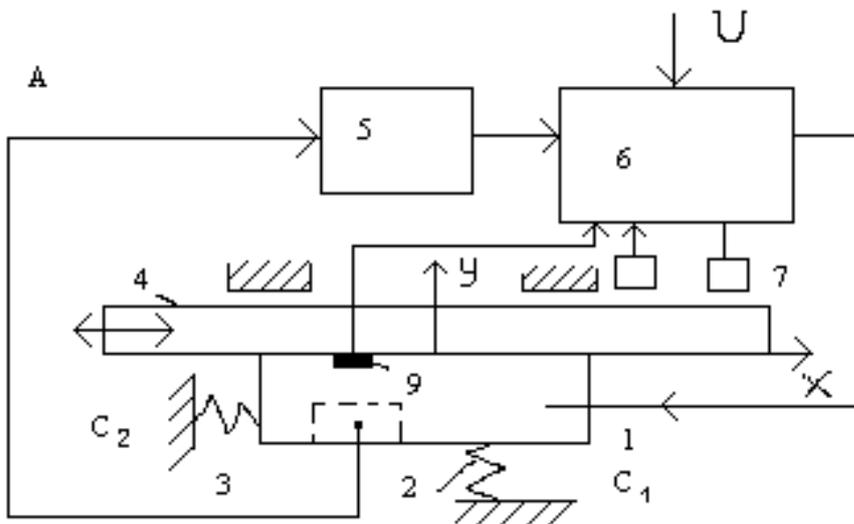


Рис. 4.22.

Блок управления 6 задает вибропреобразователю 1 колебания требуемой формы и вида в зависимости от сигнала управления  $U$ . Возбуждаются двумерные колебания, при-

чем возникает постоянная составляющая силы по оси  $x$ , чем и приводится в движение звено 4. Могут осуществляться различные обратные связи: по положению 7, по скорости 8, по силе 9, по амплитуде колебаний. Цепь А служит для стабилизации процесса возбуждения колебаний.

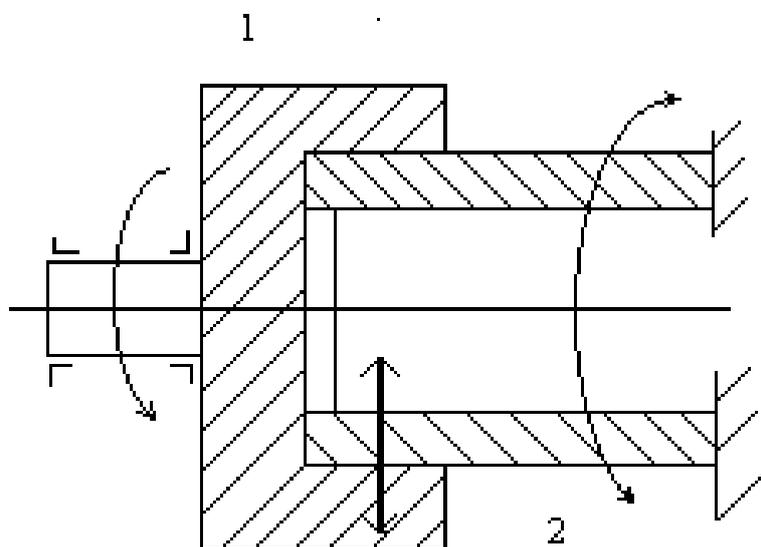


Рис. 4.23.

Возможна упрощенная схема вибродвигателя с радиально-крутильными колебаниями активного элемента 2 (частота колебаний), генерирующими вращательное движение ротора 1 со скоростью (рис. 4.23).

В последнее время большинство электродвигателей объединяют с системой управления, образуя комплектный электропривод, обеспечивающий поддержание постоянной скорости при переменных нагрузках и постоянного момента вращения при изменении скорости, переходные процессы без колебаний скорости и тока, высокую точность отработки управляющих воздействий, фиксацию вала электродвигателя электромагнитным тормозом при отключении питания.

Комплектные электроприводы делятся на разомкнутые и следящие. Разомкнутые приводы состоят из источника питания, электронного коммутатора и двигателя (без обратной связи). Следящие приводы содержат приемное и следящее устройство, усилитель, датчики обратной связи, источник питания, электродвигатель. Следящие приводы могут быть с релейным или непрерывным управлением. При релейном управлении напряжение на двигатель подается только тогда, когда рассогласование заданного и фактического параметров (скорости, положения звена, ускорения) превышает определенный порог. При непрерывном управлении напряжение зависит от величины рассогласования.

## 4.2.6. Техническая мышца – разновидность привода ПР

### 4.2.6.1. Мышцы человека

Тело человека приводится в движение с помощью поперечнополосатых мышц. Их основу составляет так называемый *анизотропный элемент* (диск) в виде круглой пластинки размером в красное кровяное тельце. Под действием управляющего сигнала этот элемент резко сокращается (в течение примерно 1 мс). После этого для возврата в исходное состояние ему требуется вдвое-втрое большее время. Таким образом, он представляет собой импульсный элемент с существенным мертвым временем. Для создания длительного непрерывного изменения усилия соединенные в цепочку анизотропные элементы перемежаются *изотропными элементами* из упругой сухожильной ткани. Эти изотропные элементы играют роль амортизаторов, быстро растягиваясь при импульсном сжатии анизотропных элементов, а затем плавно возвращаясь в исходное состояние. Цепочки анизотропных и изотропных элементов образуют *волокна*. Из этих волокон, объединенных в пучки по 10...15 в каждом, и состоит мышца. В зависимости от быстродействия и развиваемого усилия различают три группы волокон:

- быстро сокращающиеся и развивающие большое усилие, но быстро утомляющиеся волокна;
- быстро сокращающиеся, но развивающие меньшее усилие, зато более выносливые волокна;
- медленно сокращающиеся и развивающие небольшое усилие, но наиболее выносливые волокна.

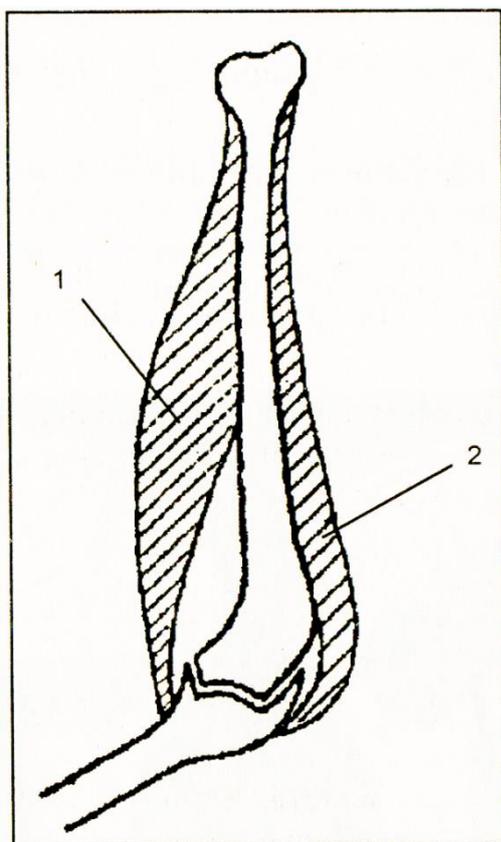
В одном пучке могут находиться волокна разных типов. Время сокращения волокон лежит в пределах 10...200 мс, а развиваемое ими усилие – от 1 до 1000 Н.

Управление мышцей осуществляется специальными двигательными нейронами – *мотонейронами*. Каждому мотонейрону подчинены волокна одного типа, которые распределены по разным пучкам мышцы. Для этого к каждому пучку подходит отдельный аксон этого мотонейрона, и его синапсы расположены на входящих в этот пучок волокнах данного типа. Объединенные таким образом по управлению однотипные волокна, принадлежащие одному пучку, называют *двигательной единицей*. В каждую двигательную единицу входит от нескольких единиц до тысяч однотипных волокон.

Управление мышцей осуществляется сериями импульсов, поступающих от мотонейронов и следующих с частотой 50...200 импульсов в секунду. В зависимости от количественного соотношения входящих в мышцу волокон разных типов образуются соответственно мышцы различного типа – от быстродействующих до медленнодействующих, но

более выносливых.

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



Мышца – это двигатель одностороннего (неревверсивного) действия, т. е. при поступлении сигнала она может только сокращаться, создавая усилие в одном направлении. Поэтому мышцы крепятся к костям по балансной схеме, образуя пары противоположно действующих *мышц-антагонистов* (рис. 4.24: 1 – мышца-сгибатель; 2 – мышца-разгибатель).

Когда одна из этих мышц, сокращаясь, осуществляет относительное перемещение костей в одном направлении, другая мышца растягивается, подготавливаясь к выполнению движения в противоположном направлении.

*Рецепторы.* Это чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в зависимости от источников собираемой ими информации. Основой их

Рис. 4.24.  
служат белковые молекулы.

Под действием внешнего раздражителя они генерируют электрический потенциал, который преобразуется в электрические импульсы определенной частоты. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

*Внешние рецепторы* – это 5 основных органов чувств (зрение, слух, осязание, обоняние, вкус), вестибулярный аппарат (в височной кости), который определяет положение тела в пространстве и ускорение, и множество рецепторов, расположенных в коже – температурные, давления, болевые. У

некоторых организмов имеются также рецепторы, чувствительные к магнитному и электрическому полям Земли.

*Внутренние рецепторы* (интеррецепторы) выдают информацию о состоянии двигательного аппарата. Они делятся на мышечные рецепторы растяжения, сухожильные и механорецепторы суставов и кожи. Мышечные рецепторы размещены в мышце и дают информацию о длине мышцы и скорости ее изменения, сухожильные – об усилии и скорости его изменения, суставные – о величине суставного угла, скорости и ускорении его изменения.

### **1.2.6.2. Мышцы робота**

Важным бионическим направлением в робототехнике является создание приводов типа *искусственная (техническая) мышца*. Современные приводы, в том числе и применяемые в робототехнике, по своим массогабаритным параметрам на порядок уступают поперечно-полосатым мышцам животных и человека. То, что параметры приводов в значительной степени определяют массогабаритные и энергетические характеристики роботов в целом, определяет интерес к проблеме создания технических аналогов таких мышц.

Одна из очевидных причин значительно большей массы у современных приводов по сравнению с мышцами – наличие в них металлов, особенно ферромагнитных в электрических двигателях. Поэтому первыми разработками приводов, получивших название искусственная мышца, были пневматические приводы, в которых цилиндр с поршнем заменялся эластичной трубкой (резина, полимеры) в оплетке крест-накрест (нейлон).

При подаче в трубку воздуха под давлением она, раздуваясь, сокращается до 1/3 длины, имитируя работу мышцы. Такие приводы имеют в 3...4 раза меньшую массу, чем пневматические цилиндры той же мощности, и поэтому они нашли применение, в частности, при протезировании конечностей. Источником сжатого газа при этом служат обычно одноразовые баллончики.

На рис. 4.25 показано устройство реверсивного привода такого типа, примененного в промышленном роботе "Софторм" фирмы "Бридже-стоун" (Япония): 1 – гибкий пневматический привод; 2 – трос; 3 – блок. Устройство состоит из 2 пневматических приводов одностороннего действия. При повышении давления в одном из них и одновременном понижении на ту же величину в другом первый привод сокращается, удлиняя второй. В результате через трос происходит поворот блока, который связан со звеном манипу-

лятора. Угол поворота блока практически прямо пропорционален разности давлений в приводах. Грузоподъемность шарнирного манипулятора с 5 степенями подвижности робота "Софтарм" – 3 кг при массе 5,5 кг. Погрешность позиционирования – 1,5 мм.

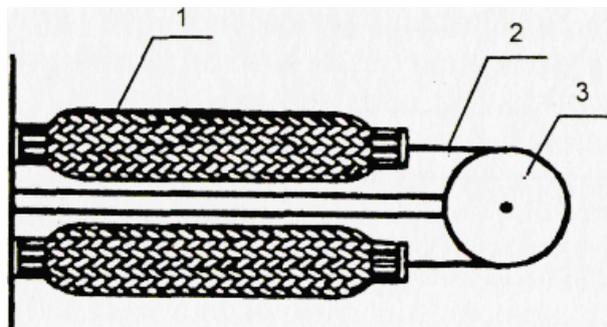


Рис. 4.25 .

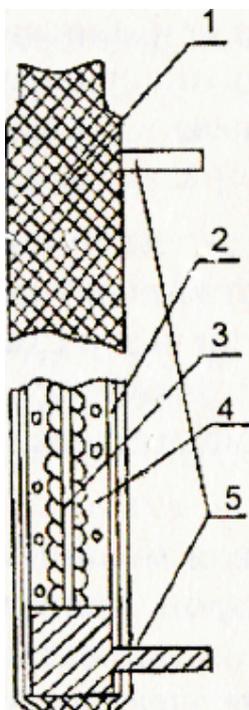


Рис. 4.26.

На рис. 4.26 показан вариант пневматической искусственной мышцы (сорбиционная искусственная мышца: 1– кордовая оболочка; 2– эластичная трубка; 3– термоэлемент; 4– наполнитель; 5– электрические выводы). В ней

газ под давлением получается непосредственно в самой трубке в результате нагрева электрическим током.

При прохождении электрического тока по термоэлементу 3 специальный наполнитель 4 нагревается и выделяет газ. В результате внутри трубки повышается давление и она, раздуваясь, сокращается в длину. После отключения тока наполнитель охлаждается, вновь поглощая выделившийся газ, и мышца приходит в исходное состояние. Длина мышцы – 150...300 мм, диаметр 3...5мм.

Величина сокращения – 10...15%. Развиваемое усилие – 1...3 Н, при массе мышцы – единицы граммов. Главный недостаток этой мышцы – очень низкое быстродействие: время сжатия больше 30 с, а обратного расслабления еще в 2...3 раза больше. Другой вариант подобной пневматической мышцы с тепловым воздействием – заполнение трубки легкокипящей жидкостью с воздействием на нее внешним источником тепла.

Разновидностью пневматических искусственных мышц являются аналогичные устройства с заменой оплетки продольными тяговыми нитями. Такие конструкции имеют лучшие тяговые характеристики и развивают большие усилия. Еще большие тяговые усилия можно получить при замене газа жидкостью под давлением, т. е. при переходе к гидравлическим искусственным мышцам. Кроме того, такие гидравлические искусственные мышцы обладают более высокой точностью позиционирования и лучшей динамикой,

как все гидравлические приводы по сравнению с пневматическими.

Наряду с описанными пневматическими и гидравлическими приводами типа искусственной мышцы существуют близкие им эластичные приводы, в которых работа совершается за счет изгибных деформаций эластичных полостей. Однако поскольку в этом случае используется деформация не сжатия как у мышц, а изгиба, эти приводы формально не относятся к искусственным мышцам. В среднем описанные пневматические и гидравлические искусственные мышцы по сравнению с аналогичными традиционными приводами (цилиндрами) в 3 раза легче, в 2 раза меньше по габаритам и развивают в десятки раз большее усилие на единицу веса.

Кроме реализованных в конкретных конструкциях типов пневматических и гидравлических искусственных мышц в мире ведутся интенсивные исследования и разработки искусственных мышц, основанных на других физических принципах. Наиболее близки к рассмотренным устройствам разработки электромагнитных и электростатических искусственных мышц.

Электромагнитная искусственная мышца состоит из многовитковой обмотки, сжатой в жгут, в котором проводники с электрическим током противоположного направления прижаты друг к другу. При пропускании по ним тока они вследствие электромагнитного силового взаимодействия расходятся в поперечном направлении. В результате длина жгута сокращается подобно описанному ранее сокращению пневматических и гидравлических мышц.

Один из первых вариантов электростатической искусственной мышцы представляет собой цилиндр, по оси которого расположен центральный электрод, а по образующим цилиндра — соединенные друг с другом гибкие периферийные электроды. При подаче на центральный и периферийный электроды электрического потенциала возникает электрическая сила, которая отталкивает периферийные электроды от центрального. В результате периферийные электроды изгибаются, вызывая сокращение мышцы.

Другой вариант электростатической мышцы выполнен в виде столбика, собранного из тонких металлических дисков (пленок), разделенных упругими изолирующими прокладками. Все нечетные и все четные диски соединены друг с другом. При подаче на них электрического напряжения разной полярности диски сближаются, сжимая изолирующие прокладки, и мышца сокращается. Вместо изолирующих прокладок может быть использован газ.

В последнее время значительные успехи достигнуты в разработке электростатических искусственных мышц из полимеров, деформирующихся в электрическом поле. Так, силиконовые и акриловые пластины толщиной в десятки *мкм* под действием напряжения в несколько кВ расширяются перпендикулярно полю более чем вдвое, создавая усилия в десятки н. Линейный привод типа искусственная мышца, выполненный из такой пленки, покрытый с двух сторон эластичными электродами, представляет собой цилиндрическую пружину, покрытую этой пленкой. При приложении к пленке электрического напряжения цилиндр удлиняется.

Аналогичные приводы создаются и на основе ионных полимеров и полимерно-металлических композитных материалов. В электрическом поле молекулы этих материалов ионизируются и испытывают механические силы, которые вызывают деформацию материала в направлении, перпендикулярном градиенту электрического поля. На этом принципе был основан, в частности, пятипальцевый схват для манипуляторов.

Разрабатываются также искусственные мышцы на базе различных искусственных волокон, деформируемых под действием химических реагентов. Для всех них характерным является низкое быстродействие (секунды) и величины хода (деформации) порядка 10...15%. Общим достоинством всех предложенных приводов типа искусственная мышца являются в несколько раз лучшие массогабаритные параметры по сравнению с традиционными приводами.

#### **4.2.7. Рекуперация энергии в приводах ПР**

Приводы роботов работают в основном в переходных циклических режимах типа разгон-торможение. Поэтому одним из важных способов экономии энергии у них может служить использование идеи *рекуперации энергии*.

Это особенно важно для мобильных роботов с автономным энергопитанием. Кроме того, при этом часто повышается и быстродействие. Рекуперация энергии основана на ее запасании в процессе торможения и отдачи при последующем разгоне.

Существуют два основных способа такого запасаания энергии: запасаание механической энергии (с помощью маховиков, пружин) и электрической (в аккумуляторах, конденсаторах, индуктивных катушках). В отечественных цикловых промышленных роботах получил применение принцип рекупера-

ции механической энергии с помощью пружин. Благодаря этому по своим энергетическим характеристикам они не имеют аналогов в мире.

В цикловой привод введена пружина, которая обеспечивает циклическое движение манипулятора в режиме резонансных незатухающих колебаний с нулевой скоростью в крайних точках. Двигатель привода осуществляет только подпитку энергией пружины в середине пути при максимальной скорости движения, восполняя потери энергии на выполняемую приводом работу.

При этом в конечных точках движения не происходит удара с бесполезным рассеянием накопленной приводом кинетической энергии. В результате в 3...4 раза снижается энергопотребление и соответственно может быть уменьшена мощность двигателя в приводе. Аналогичный эффект может быть получен в приводах захватных устройств манипуляторов.

На рис. 4.27 приведена схема электрического привода с рекуперацией электрической энергии:  $D$  – двигатель;  $E_1, E_2$  – источники напряжения постоянного тока;  $УУ$  – устройство управления;  $ДС$  – датчик скорости;  $K$  – ключи;  $L$  – индуктивность.

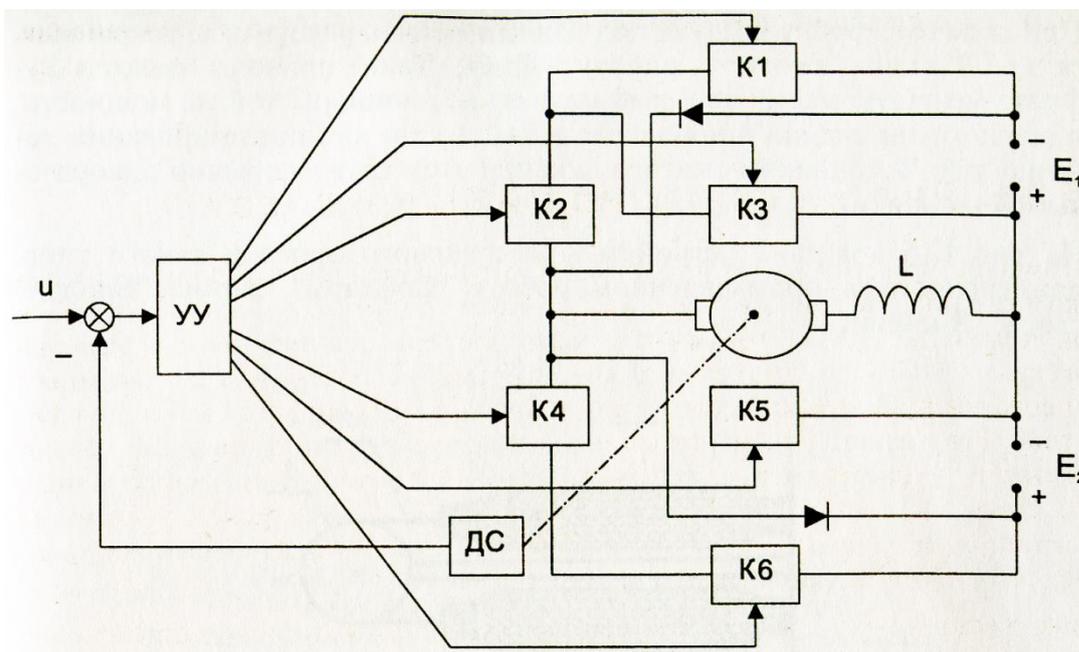


Рис. 4.27.

Энергия, которая возвращается в источники питания в режиме рекуперативного торможения, запасается в индуктивности  $L$ . Ключи  $K_2, K_4$  предназначены для реверсного управления двигателем от двухполюсного источника  $E_1, E_2$ , а ключи  $K_1, K_3, K_5, K_6$  – для осуществления ре-

жима рекуперации. В режиме движения под действием двигателя  $D$  ключи  $K1$  и  $K4$  замкнуты, а ключи  $K3$  к  $K5$  разомкнуты. Режим рекуперации включается при торможении, когда знаки производной от заданной скорости и скорости двигателя разные. Для этого устройство управления размыкает ключи  $K1$  и  $K6$ , замыкает  $K3$ ,  $K5$  и инвертирует  $K2$  и  $K4$ . Аналогичные схемы разработаны с использованием в качестве накопителей энергии конденсаторов.

### 4.3. Механизмы передач ПР

В модулях промышленных роботов всегда предпочтительной является прямая передача, когда выходное звено двигателя непосредственно, через жесткое соединение или через упругую муфту соединяется с подвижной частью. Так, если двигателем является пневмоцилиндр, то желательно, чтобы шток пневмоцилиндра был непосредственно соединен с подвижной частью (например, представлял собой часть выдвигной руки), если двигатель поворотный, то желательно, чтобы подвижная (поворотная) часть была насажена на выходной вал. Для некоторых механизмов, прямая передача невозможна по ряду причин необходимо введение дополнительных механизмов передач.

Передачи в роботах выполняют разные функции: передают движение на подвижную часть от далеко отстоящего двигателя, изменяют ось линейного перемещения или ось вращения, изменяют вид движения. Например, преобразуют вращательное движение в прямолинейное поступательное или наоборот. Изменяют величины линейных перемещений или углов поворота (при этом обратно пропорционально изменяются передаваемые силы и моменты). Используются при этом различные виды простых механизмов: зубчатые, шарнирно-рычажные, винтовые, червячные, с упругими звеньями, а также комбинированные механизмы, построенные на различных сочетаниях перечисленных простых механизмов.

При выборе видов механизмов учитываются естественные требования простоты, надежности, ограниченности масс и габаритных размеров, а также в различных сочетаниях такие специальные требования, как высокая точность, постоянство передаточного отношения, возможность получения больших передаточных отношений при малом числе звеньев, малость потерь, удобство совместной компоновки и развязки Движений для нескольких передач.

Самостоятельной является задача построения механизмов для передачи Движений через подвижные звенья. Схемные и конструктивные решения передач определяются в первую очередь видом движения и типом механизма. В дальнейшем обзоре эти признаки считаются главными, обращается внимание на то, в каких именно механизмах роботов встречаются те или иные задачи преобразования движений. Передачи перечисляются преимущественно в порядке усложнения.

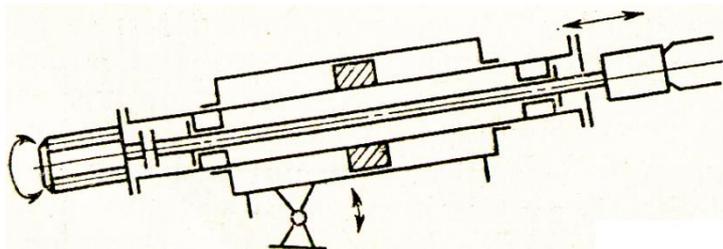


Рис. 4.28.

Передача вращения от достаточно удаленного двигателя через жесткий вал без изменения угловой скорости вращения нередко встречается в конструкции выдвигной руки, когда вращательный двигатель располагается на

заднем, противоположном схвату конце руки (рис. 4.28).

Такая компоновка позволяет частично уравновесить руку и устранить двигатель из рабочей зоны. Вал при этом выполняется в виде тонкостенной трубы. Передачи длинными трубчатыми валами используются также в конструкциях роботов с качающейся складной рукой, когда двигатели играют роль противовесов. Для нормальной работы передачи при возможных перекосах и линейных смещениях на концах вала закрепляются упругие муфты или вводятся другие упругие элементы.

Когда оси вращательного двигателя и вращаемого звена параллельны, используется передача с цилиндрическими зубчатыми колесами или с цепью, или с зубчатым ремнем (рис. 4.29). Современная технология позволяет выполнять передачи с зубчатыми ремнями весьма жесткими и точными. При использовании цепных и ременных передач необходимо

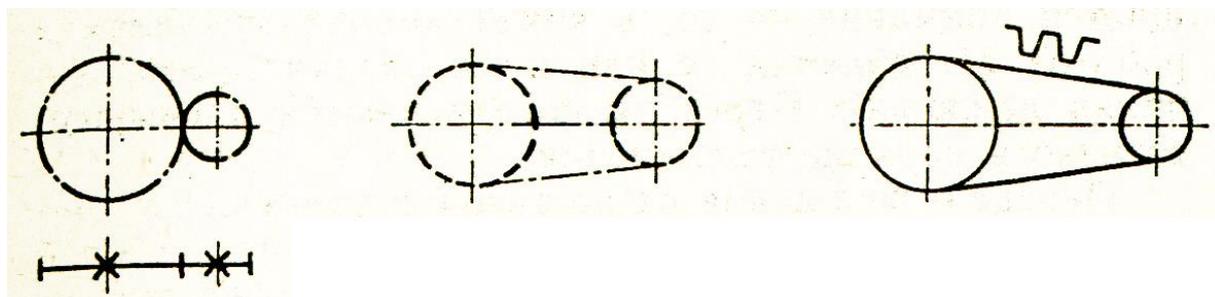


Рис. 4.29.

принимать специальные меры для создания и стабилизации натяжения. При передаче вращения между пересекающимися валами чаще всего ис-

пользуются конические зубчатые передачи. Во всех случаях могут быть получены передаточные отношения до 3..5.

Значительно сложнее решается задача передачи вращения от двигателя, установленного на одном звене, через другие звенья, подвижно соединенные с этим звеном. Такая передача движения требуется, например, тогда, когда двигатель одной из степеней подвижности расположен на неподвижном или поворотном основании в начале кинематической цепи (что облегчает последующие звенья механизма) и необходимо передавать движение через кинематические пары. Если кинематическая пара поступательная, то вращение обычно передается раздвижным телескопическим валом, половины которого соединены шлицевым или шпоночным соединением. Если кинематическая пара вращательная, то передача вращения через шарнир, соединяющий звенья, осуществляется обычно с помощью конического дифференциала. При использовании дифференциала поворот последующего звена относительно предыдущего не вызывает вращения выходного вала, который поэтому один к одному воспроизводит вращение входного вала. В этих случаях осуществляется развязка движений по координатам. Выпускаются манипуляторы, у которых все двигатели располагаются на одном основании и необходимы передачи от двигателей ко всем шарнирам. Эти передачи выполняются соосными, так что трубчатые валы, передающие вращения, находятся один в другом; также соосными являются и конические дифференциалы. Схема такой передачи изображена на рис. 4.30.

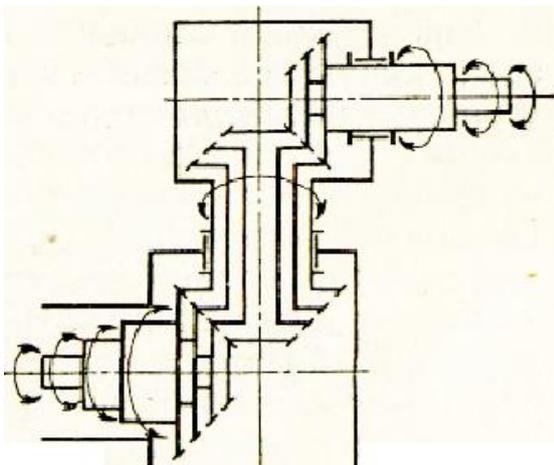


Рис. 4.30

Такие передачи широко используются в копирующих манипуляторах с ручным управлением. При большом числе степеней подвижности манипулятора механизмы передач получаются сложными и громоздкими.

Передача прямолинейного поступательного движения по одной оси в том же направлении проще всего осуществляется с помощью жесткой штанги. Такое соединение двигателя с подвижной частью используется,

когда двигатель удален, а также когда несколько пневмоцилиндров, работающих параллельно, перемещают одну и ту же подвиж-

ную часть. Передача прямолинейного движения через кинематические пары представляет определенные трудности и проще всего осуществляется при применении гибких элементов.

На рис. 4.31а изображена тросовая передача через поступательную пару; передача выполнена так. Что правый конец троса перемещается относительно второго звена (правого) только при перемещении левого конца относительно первого звена (левого). Если же второе звено выдвигается из первого, то при закрепленном левом конце троса правый конец не изменяет положения относительно второго звена, перемещаясь вместе с ним.

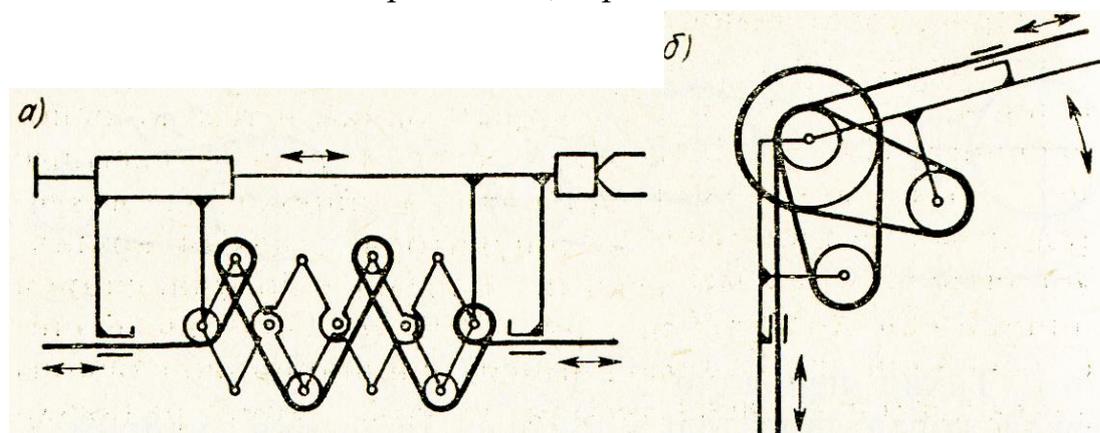


Рис. 4.31.

На рис. 4.31б изображена тросовая передача через вращательную пару. При закрепленном левом конце троса поворот второго звена не приводит к перемещению правого конца относительно этого звена. В обеих схемах должно быть обеспечено постоянное натяжение тросов. Известны также другие схемы с такими же свойствами. Если двигатели манипулятора с несколькими степенями подвижности установлены на основании, то, комбинируя подобные приемы, можно пропускать тросы через промежуточные звенья до нужных кинематических пар, причем каждый двигатель будет задавать перемещение по своей координате независимо от других двигателей, т. е. будет иметь место развязка по степеням подвижности.

При необходимости развязки по степеням подвижности, когда двигатели связаны с одним и тем же основанием, часто используются совсем другие схемные решения.

На рис. 4.32 изображена широко используемая схема механизма манипулятора с двумя вращательными кинематическими парами. Оба пневмоцилиндра являются качающимися, они шарнирно связаны с основанием. Реализуемая в этой схеме развязка заключается в следующем. Если пневмоцилиндр 1 не работает (поршень зафиксирован), а работает пневмо-

цилиндр 2, то рычаг  $DE$  поворачивается вокруг точки  $A$ . Если же работает только первый гидроцилиндр, то вокруг точки  $B$  поворачивается рычаг  $BA$ , а рычаг  $DE$  перемещается поступательно, параллельно самому себе (это следует из того, что четыре шарнирно соединенных звена образуют параллелограмм  $ABCD$ ). Таким образом, первый гидроцилиндр изменяет только угол  $\varphi_1$ , а второй – только угол  $\varphi_2$ .

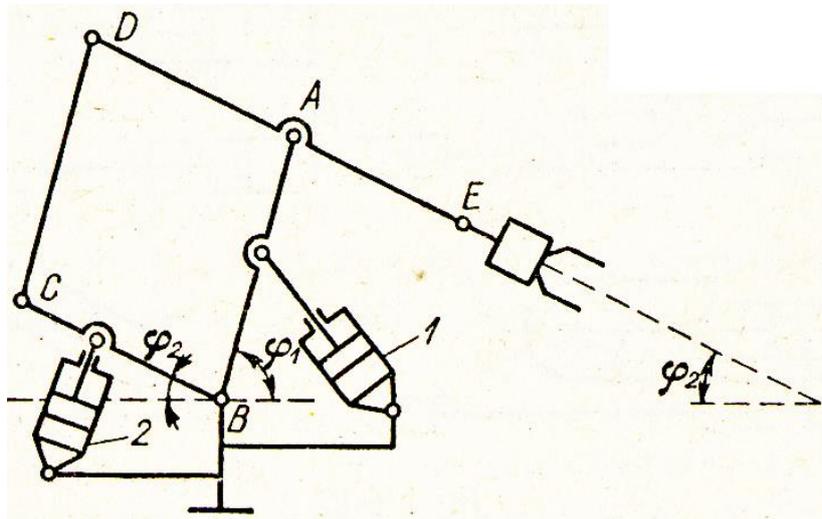


Рис. 4.32.

Чаще все же двигатели располагаются непосредственно у узлов, реализующих кинематические пары (каждый двигатель у своей кинематической пары). Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только такие передачи, все элементы ко-

торой находятся на одном жестком звене. При использовании большинства вращательных электродвигателей основной задачей передачи является редукция, т. е. уменьшение частоты вращения при увеличении во столько же раз вращающего момента. Оценим, каково должно быть передаточное отношение редуктора. Обычно требуемая угловая скорость поворота подвижной части имеет порядок  $180^\circ/\text{с}$ , или  $31/\text{с}$ . Если считать, что частота вращения ротора электродвигателя равна  $3000$  об/мин, или  $300$  1/с, то требуемое передаточное отношение будет равно ста.

При других исходных данных, встречающихся на практике, получается, что передаточное отношение составляет несколько десятков или несколько сотен. Если на выходе передачи нужно иметь вращение, то часто используются обычные многоступенчатые (трех- или четырехступенчатые) редукторы с цилиндрическими зубчатыми колесами. Иногда достаточно использовать серийные электродвигатели со встроенными редукторами (мотор-редукторы). Обычные редукторы общемашиностроительного назначения иногда оказываются недостаточно точными (когда роботы должны быть высокоточными, например, при выполнении сборочных операций), они могут быть ненадежными в режимах частых переключений. Для устранения зазоров (когда они не убираются силами веса) используют хорошо разработан-

ные приемы (вводят разрезные шестерни, замкнутые кинематические цепи с упругими элементами, устанавливаемыми с первоначальным натягом).

Считается целесообразным использование более сложных, планетарных, а также новых, в первую очередь волновых редукторов. Они дают значительное сокращение масс и габаритных размеров. При скрещивающихся входной и выходной осях иногда используют червячные редукторы. Все они позволяют получать на одной ступени требуемые большие передаточные отношения.

Преобразование линейного поступательного движения также в линейное поступательное, но с увеличением хода необходимо тогда, когда ход гидро- или пневмоцилиндра меньше требуемого хода подвижной части.

Две типовые схемы удвоения хода изображены на рис. 4.31а,б. В первой из них используется реечная передача, с двумя рейками, во второй – цепная передача. Преобразование линейного поступательного движения во вращательное необходимо чаще всего в механизмах вращения манипулятора вокруг вертикальной оси, качания вокруг горизонтальной оси, ротации рабочего органа, когда двигателем является гидро- или пневмоцилиндр. В случаях, когда требуемые значения углов поворота большие ( $180^\circ$  или более), чаще всего используется реечная передача.

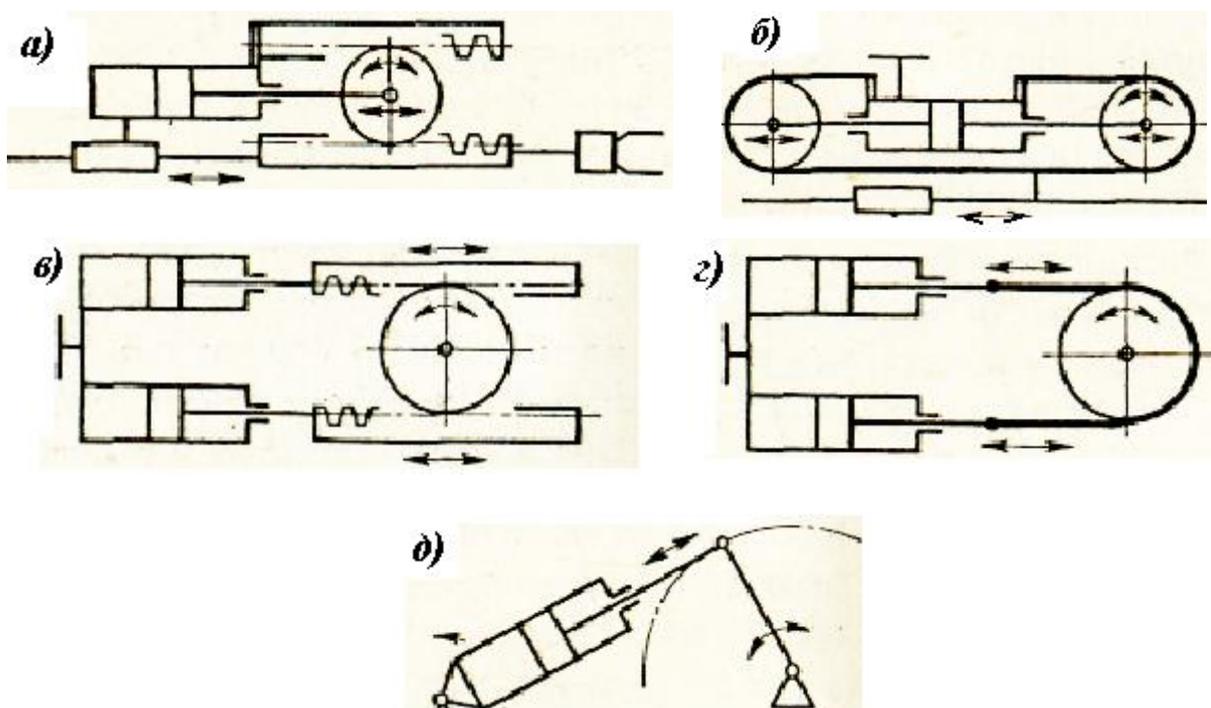


Рис. 4.33.

По схеме на рис. 4.33в серийно выпускаются унифицированные поворотные пневмодвигатели, построенные на паре пневмоцилиндров. Для

такого же преобразования используются тросовые и цепные передачи (рис. 4.33г). В случаях же, когда требуются малые углы поворота, вследствие простоты чаще используются шарнирно-рычажные механизмы, например, с качающимся цилиндром, как на рис. 4.33д. Передачи, преобразующие вращение в линейное перемещение, используются преимущественно в механизмах межпозиционных степеней подвижности и переносных поступательных степеней подвижности (в частности, подъема, выдвигания руки), когда двигателем является электромотор.

При больших ходах, порядка нескольких метров (для межпозиционных перемещений), используют тросовые и цепные передачи, если не требуется высокая точность задания перемещений; когда требуется высокая точность, то чаще применяется реечная передача (рейка неподвижна и крепится по всему пути, а двигатель с передачей на шестерню находится на подвижной части). В последнее время для больших перемещений стали также использовать передачи зубчатым ремнем, который перемещается как трос или цепь, но обеспечивает высокую точность.

При небольших перемещениях также используется реечная передача, но подвижной является рейка, а двигатель вместе с ведущей шестерней неподвижны (или устанавливаются на предыдущем звене). Для не очень больших перемещений также часто используется винтовая передача: двигатель вращает ходовой винт с однозаходной или многозаходной резьбой, а гайка связана с перемещаемой кареткой. В зависимости от требуемой скорости перемещения двигатель или связан с ходовым винтом через муфту, или вращение передается через редуктор с передаточным отношением порядка нескольких единиц. Для повышения жесткости и надежности работы передача выполняется удвоенной, при этом ходовые винты могут вращаться или от одного двигателя или от двух синхронно работающих двигателей. Для уменьшения моментов сил трения винтовых передач в некоторых роботах используют шариковинтовые пары. Подобные передачи применяются в самых точных роботах (измерительных, сборочных).

В механизмах роботов встречаются комбинированные передачи, представляющие собой объединение простых передач, описанных ранее. Например, используется комбинированная передача винт-гайка плюс шарнирно-рычажный механизм (рис. 4.34). Конструкции, выполненные по этой схеме, получаются простыми и надежными. Их недостаток – ограниченность угла поворота.

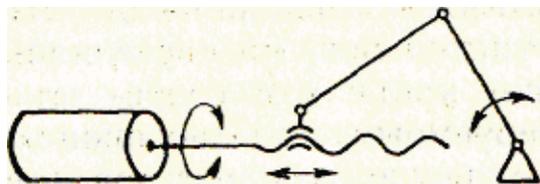


Рис. 4.34.

## 5. Несущие конструкции ПР

Несущие конструкции роботов строятся в соответствии с их кинематическими схемами. Соединение звеньев несущей конструкции должно представлять возможность свободных перемещений по степеням подвижности (перемещения задаются двигателями приводов). В то же время конструкции роботов должны воспринимать нагрузки по другим направлениям и обеспечивать требуемую высокую жесткость по отношению к перемещениям и углам поворота.

Для роботов с межпозиционными перемещениями наиболее громоздкой и металлоемкой частью конструкции является неподвижная стационарная конструкция с длинными направляющими (в частности, рельсами). Для подвесных роботов такой конструкцией является портал, его масса обычно составляет сотни или тысячи килограммов (до 80 % и более суммарной массы робота). Варианты порталов изображены на рис. 5.1. Обычно порталы являются сварными, стойки и ригели свариваются из труб, стандартных профилей (напримёр, швеллеров) или плоских листов. Часто направляющие, по которым катятся ролики или колеса подвижных кареток, изготавливаются отдельно и крепятся на ригели. Предусматривается возможность регулировки их положения.

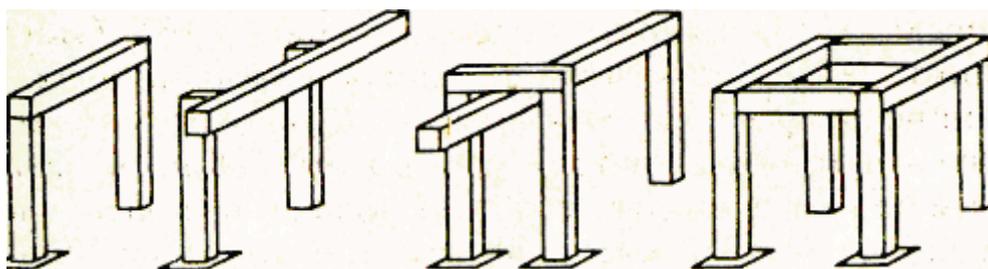


Рис. 5.1.

У подвижных роботов (напольных или подвесных) основанием является тележка с колесами или роликами. Колеса иногда делают и у стационарных роботов (чтобы их можно было вручную подкатить или откатить). Но во всех случаях у стационарных роботов имеются устройства для установки на полу или для крепления к фундаменту. Обычный наполь-

ный промышленный робот имеет основание в виде отливки или сварной конструкции в форме тумбы или коробки. Часто основание является массивным, его масса составляет около 50 % массы робота. Особенно большую массу имеют основания роботов с гидроприводом, когда на них устанавливаются гидростанции. Встроенные промышленные роботы, устанавливаемые на оборудовании, могут иметь только устройства крепления без основания как такового.

Общий вид и конструктивные особенности звеньев в первую очередь зависят от того, какие кинематические пары соединяют их со смежными звеньями. Рассмотрим кратко сначала узлы, реализующие поступательные кинематические пары. Относительное перемещение соседних звеньев осуществляется по направляющим. Могут быть два типовых случая последовательности элементов узла кинематической пары: в

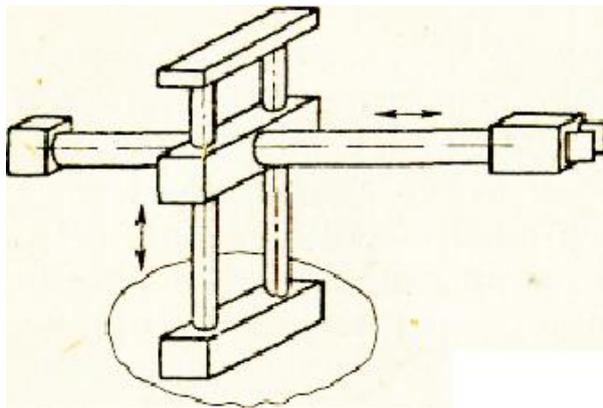


Рис. 5.2.

первом случае неподвижными (или условно неподвижными, т. е. близкими по кинематической цепи к основанию) являются направляющие, по ним перемещается каретка; во втором случае неподвижными являются опоры, по ним перемещаются направляющие. Для примера на рис. 5.2 изображена схема поворотной части механизма манипулятора, работающего в цилиндрической системе координат. Вертикальное перемещение каретки по направляющим соответствует первому случаю, выдвижение руки – второму случаю. Направляющие, принадлежащие звену, обычно идут по всей его длине. Чаще всего встречаются следующие варианты направляющих.

Чаще всего встречаются следующие варианты направляющих.

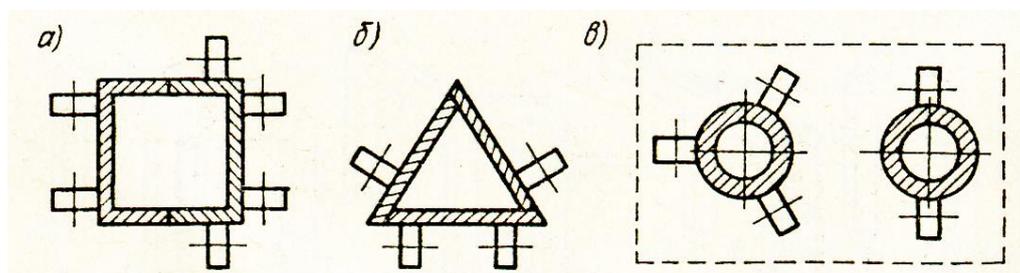


Рис. 5.3.

**Направляющая одна.** Чтобы исключить вращение вокруг продольной оси, сечение направляющей обычно выбирается прямоугольным, в частности квадратным (рис 5.3а) или треугольным (рис. 5.3б).

**Направляющих две.** Одна направляющая является основной, другая – вспомогательной. Сечения направляющих могут быть любыми, часто они делаются круглыми (рис. 5.3в).

Если двигателем является пневмоцилиндр и подвижными являются направляющие, то главной направляющей часто является шток пневмоцилиндра, при этом двигатель включается в несущую конструкцию. Подобное решение типично для выдвижной руки робота с пневмоцилиндром (рис. 5.4а) Для механизма подъема распространенной является конструкция с основной направляющей большого диаметра, внутри которой располагается пневмоцилиндр (рис. 5.4б). При этом дополнительная направляющая может быть снаружи или внутри.

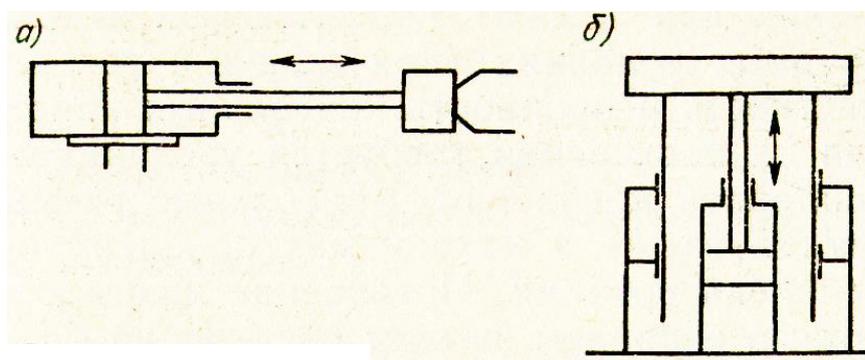


Рис. 5.4.

**Направляющих несколько,** все они одинаковые (обычно круглого сечения), располагаются по одной прямой, в вершинах

равностороннего треугольника или квадрата. Направляющие обычно являются тонкостенными, при круглом сечении представляют собой трубы с толщиной стенки 2...5 мм. Опоры могут быть качения и скольжения. В опорах качения используются ролики или непосредственно шарикоподшипники; основные из них имеют жестко закрепленные оси, а некоторые целесообразно устанавливать подпружиненными, чтобы устранять зазоры и исключить заедание, возможное вследствие изменения толщины направляющих.

Опоры скольжения делаются исключительно для направляющих круглого сечения, для уменьшения трения и износа устанавливают втулки из антифрикционных материалов.

Узлы, реализующие вращательные пары, выполняют консольными (рис. 5.5а) или двухопорными (рис. 5.5б). Консольное крепление вала имеет то преимущество, что не ограничивается углом поворота. Поэтому большинство механизмов поворота вокруг вертикальной оси делают консольными.

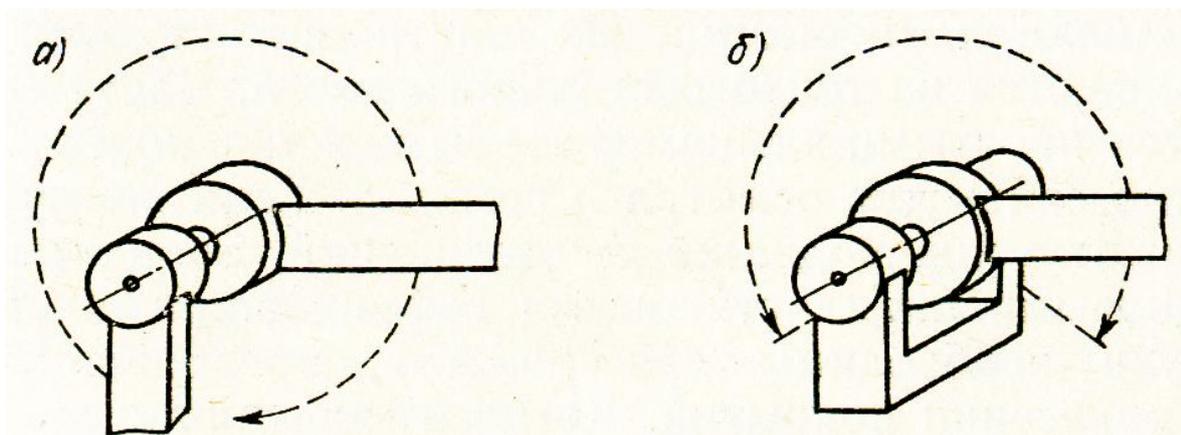


Рис. 5.5.

При прочих равных условиях (при одних и тех же сечениях) жесткость и прочность консольных конструкций ниже, для их повышения требуется увеличивать сечения и усиливать крепления. Консольные схемы часто используются также в механизмах ориентирования, в первую очередь ротации. Повышение жесткости здесь достигается в основном за счет увеличения базы (увеличения расстояния между подшипниками). Двухопорные конструкции используются чаще всего в механизмах складной руки (с горизонтальными и вертикальными осями) и в механизмах ориентирования, когда достаточно иметь ограниченные углы поворота.

В опорах используются исключительно подшипники качения (шариковые или роликовые). Средние части звеньев механизмов с вращательными кинематическими парами представляют собой тонкостенные профили довольно больших размеров сечений. Чаще всего встречается прямоугольное сечение. Такие звенья представляют собой отливки из алюминиевых сплавов, но иногда их изготавливают сваркой стандартных профилей.

Пространство внутри замкнутых и незамкнутых профилей используют для размещения трубопроводов, кабелей и иногда элементов передач. Значительная часть роботов имеет кожухи, которые закрывают передачи, двигатели, элементы технологического оборудования, подшипниковые узлы и пр. Они выполняют различные функции: защиты от пыли, высокой температуры, распыленной краски, повышения безопасности обслуживания. Ведущие зарубежные фирмы много внимания уделяют художественной проработке форм кожухов, нередко именно кожухи преимущественно определяют общий эффективный вид робота.

Если кожухи крепятся на одном звене, то они выполняются жесткими, их части штампуются или свариваются из тонкого стального листа. Части соединяются простыми замками, чтобы кожухи можно было

быстро снять для осмотра и ремонта. Если кожухи закрывают узлы подвижных соединений, то их делают резиновыми или пластиковыми, гофрированными. Такие кожухи необходимы для роботов, предназначенных для нанесения покрытий. Когда из-за налипшего слоя краски они теряют упругость, их заменяют.

## **6. Рабочие органы технологических ПР**

Технологические промышленные роботы разнообразны по назначению, соответственно многочисленны типы и виды используемых в них технологических (рабочих) органов. Иногда рабочие органы (РО) проектируются и изготавливаются для роботов специально, с учетом специфики условий их работы, но чаще приспособливаются или ручные устройства (инструменты) или рабочие органы автоматических установок того же назначения.

При выполнении технологических операций в роботизированных технологических комплексах может перемещаться рабочий орган, или изделие, или одновременно перемещаются оба. Если перемещается только изделие, то рабочий орган робота обычно представляет собой захватное устройство, а рабочий орган стационарный и механически не связан с роботом.

В дальнейшем основное внимание обращается на случаи, когда рабочий орган является подвижным, его переносит манипулятор робота. Выделяются лишь те вопросы, которые связаны с построением робота в целом, и лишь кратко упоминаются чисто технологические требования. В число выделенных вопросов, важных для робота в целом, включаются данные о массовых (весовых) характеристиках, об энергопотреблении, о способах и трудностях подвода энергии, о целесообразности или необходимости средств очувствления, требования к способам и средствам закрепления на руке с учетом условий простой заменяемости (вручную или автоматической). Технологические рабочие органы разделяются на группы. Рассмотрим основные группы.

### **6.1. Технологические РО**

Эти РО предназначены для выполнения операций сверления, фрезерования, шлифования, полирования. Их отличительной особенностью является наличие самостоятельного привода (обычно электромеханического) для выполнения главного движения. Этот привод предназначается обычно для вращения инструмента: сверла, фрезы, шлифовального круга, притира и т. п. Мощность такого привода обычно составляет десятки или сотни ватт.

Усилия взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием обычно составляют несколько десятков ньютонов (значительно меньше, чем у станков того же назначения), эти усилия являются нагрузкой для манипулятора. Как правило, движения подачи осуществляются манипулятором, но иногда рабочий орган имеет самостоятельный, обычно линейный привод подачи (электрический или гидравлический). Так, при сверлении подача осуществляется по оси вращения инструмента.

Если рабочий орган имеет привод подачи, то в этом случае фактически он добавляет манипулятору одну степень подвижности (обычно поступательную). Рабочий орган в целом при этом становится аналогичным по схеме и конструктивным особенностям силовой головке агрегатного станка. В самом простом случае самостоятельный привод подачи отсутствует, привод главного движения не имеет редуктора или имеет редуктор без переключения скоростей. Так, при сверлении может быть использована ручная дрель.

В рабочем органе для шлифования обычно в качестве инструмента используется шлифовальный круг, но имеются конструкции, в которых инструментом является шлифовальная лента с абразивным или алмазным покрытием, которая при шлифовании хорошо облегает выпуклые поверхности и позволяет получать лучшее качество обработки. Уровни сложности управления рабочим органом могут быть разными. В простейшем случае осуществляется только включение и выключение двигателя.

В более сложных случаях предусматривается изменение частоты вращения переключением скоростей (вручную или автоматически). В ответственных случаях необходимо фиксировать момент касания инструментом изделия, контролировать усилия взаимодействия инструмента с изделием. Для этого в рабочем органе устанавливаются датчики силомоментного ощущения, но это необязательно, с этой же целью может осуществляться измерение токов в силовых цепях электродвигателей главных приводов.

В узлах соединений с рукой иногда целесообразно предусматривать упругие элементы с первоначальным натягом, чтобы предотвращать возможные поломки инструмента.

## **6.2. РО для сборки и разборки изделий**

По конструкции они могут быть различными. Когда роль сборочного робота сводится к установке одной детали на другую, неподвижную, установленную на фиксированную позицию, или же к сопряжению детали с неподвижной по заданным поверхностям (например, при сборке пары вал-втулка) без приложения значительных усилий, рабочим органом робота яв-

ляется специальный или специализированный схват.

Специфика может заключаться только в упругом подвешивании схвата (для облегчения выполнения сопряжения и исключения явлений заклинивания). Если же выполняются более сложные операции, например сборка винтовых соединений, рабочие органы могут быть функционально специализированными, ориентированными на выполнение отдельных этапов сборочного процесса, или комбинированными. При дифференциации операций по этапам один робот схватом устанавливает винты на место (рабочим органом является схват), а другой – винтовертом заворачивает винты (рабочим органом является винтоверт).

Комбинированные рабочие органы обычно являются модифицированными узлами сборочных автоматов того же назначения. Эти узлы в автоматах обычно неподвижны, в них совмещаются функции накопления деталей (например, винтов), их ориентирования, подачи на сборочную позицию, собственно сборки (в частности, заворачивания), а также иногда контроля сборки.

Комплексные сборочные устройства обычно достаточно сложны в проектировании, наладке и эксплуатации, но обеспечивают большую производительность. Значительно более простыми могут быть рабочие органы для автоматической разборки, необходимой при ремонте изделий и разукомплектовании – разборке на запчасти.

Приспособление узлов сборочных автоматов к роботам часто требует серьезной модернизации с целью снижения массы и габаритов, упрощения наладки и обслуживания. При сборке пар деталей с малыми зазорами часто точности работа недостаточно, чтобы начать процесс сборки (например, попасть торцом вала в отверстие), тогда на рабочем органе устанавливаются датчики смещений или сил. Роботы используются не только при сборке без приложения значительных сил. Для случаев, когда соединение или закрепление осуществляется запрессовыванием или пластическим деформированием (например, путем обжатия), рабочим органом обычно являются специальные клещи с силовым приводом. Рабочие органы для соединения способами сварки, пайки, склеивания и прочее выделяются в отдельные группы.

### **6.3. Сварочные РО**

Наиболее распространенной в машиностроении является сварка плавлением, а именно, электрическая сварка открытой дугой и газовая сварка. Рабочим органом при этом является сварочная горелка. При элек-

тросварке основным элементом является электрод, плавящийся или неплавящийся (вольфрамовый). Плавящийся электрод представляет собой электродную проволоку, которая в процессе сварки должна подаваться с заданной скоростью в зону дуги. В ответственных случаях для улучшения качества сварного шва в зону плавления подается защитный газ (аргон или углекислый газ). Для сохранения непрерывности процесса сварки и выдерживания требуемых режимов расстояние между электродом и швом должно выдерживаться постоянным, допустимы, не очень большие отклонения также и в поперечном направлении.

Для контроля положения горелки относительно шва часто используются специальные датчики, по сигналам их и других датчиков осуществляется коррективное движение рабочего органа. Таким образом, в рабочем органе для электросварки совмещаются сама горелка со средствами подвода тока и если необходимо, защитного газа, устройство для автоматической подачи проволоки, измерительное устройство для определения положения горелки относительно шва. При применении неплавящегося электрода исключается устройство подачи проволоки.

Ввиду сложности задач сварки для роботов разрабатываются специальные рабочие органы, в них многое обычно заимствуется от горелок сварочных автоматов, в частности самоходных сварочных тракторов. Однако обычно оказывается необходимым сокращать их массы и габариты. Для большинства сварочных роботов масса рабочего органа: имеет порядок 10 кг.

Рабочий орган для газовой сварки представляет собой горелку с подводом горючего газа и кислорода, в ней предусматривается устройство для включения и выключения подачи газов и автоматического плавного регулирования расхода. Для термической (огневой) резки используются горелки, подобные горелкам для газовой сварки, но находят также применение горелки для кислородной -и плазменной; резки, имеющие существенные особенности. Масса газовых горелок обычно меньше, для роботов эти горелки имеют массу, не превышающую 5 кг.

Грузоподъемность манипуляторов выбирается со значительным запасом, с учетом масс вспомогательных устройств и коммуникаций. Определенные трудности представляет размещение и крепление кабелей и шлангов больших сечений. Они могут заметно стеснять движения манипулятора. Иногда они крепятся к звеньям манипулятора. Однако часто это неудобно, и кабели и шланги подвешивают на специальные опоры. Стремятся избегать большого числа разъемных соединений.

Используют также РО ПР для электрической или вибрационной точечной сварки. Электрическое сваривание листовых деталей внахлест производится путем их сжатия с последующим пропусканием импульса тока; при этом происходит расплавление металла в зоне контакта и детали свариваются.

Сжатие может происходить между двумя электродами, рабочим органом при этом являются специальные сварочные клещи; достоинством такого рабочего органа является то, что сваривание может производиться «навесу» и в любом положении.

Если же детали должны привариваться к одной плоской детали, то эта деталь укладывается вниз, на токопроводящее основание, а привариваемая деталь прижимается сверху одним электродом.

Метод обладает широкими возможностями: можно сваривать детали толщиной от сотых долей до нескольких миллиметров (усилие прижатия и импульс тока выбираются в зависимости от толщины). Для деталей толщиной около 1 мм необходимое усилие сжатия значительно, порядка нескольких сотен килограммов, очень большими должны быть значения силы тока – порядка 10 кА, длительность импульса тока составляет несколько десятых секунды.

Для создания больших усилий в качестве двигателя в сварочных клещах желательно использовать гидроцилиндр – пневмоцилиндры достаточно громоздки.

Важным элементом является сварочный трансформатор. Чтобы избежать больших потерь, сечение проводников должно быть большим, так что совершенно исключается подвод тока кабелем. Поэтому сварочный трансформатор входит в состав рабочего органа и располагается в непосредственной близости от сварочных клещей.

Кабелем подводится к трансформатору напряжение питания из сети. В результате масса сварочных клещей для сварки листов порядка 1 мм получается большой – 10...30 кг.

Рабочий орган имеет устройство включения-выключения, режимы в процессе работы не регулируются, а устанавливаются при первоначальной наладке. Для сваривания миниатюрных деталей (в частности, в приборостроении и электронике) применяются и электросварка (обычно одним электродом, прижимающим деталь к основанию) и вибросварка.

В последнем случае при прижатии сваривание деталей происходит под действием высокочастотных вибраций, создаваемых ультразвуковым электромеханическим вибратором (чаще всего магнитострикционным).

#### **6.4. РО для очистки поверхностей деталей воздухом**

Рабочие органы для обдува воздухом просты. Основными элементами являются сопло с регулируемым или нерегулируемым сечением, автоматический клапан (обычно с электромагнитным управлением). Питание осуществляется от сети сжатого воздуха с давлением 0,5 или 1,0 МПа; в случае необходимости снижения давления используются дроссели. Вследствие простоты рабочих органов для обдува они нередко совмещаются с другими рабочими органами, например со схватами.

#### **6.5. РО для поверхностной обработки изделий**

Такая обработка чаще всего используется для очистки поверхностей заготовок после литья, но иногда и для изменения механических свойств поверхностных слоев материалов. Принцип действия заключается в том, что песок или дробь захватываются струей сжатого воздуха, при этом частицы песка или шарики дроби вылетают из сопла с большой скоростью.

Подача сжатого воздуха из сети труда не представляет, однако возникают сложности в надежной подаче песка или дроби из резервуара. Обычно резервуар ставится в стороне, но на небольшом расстоянии и сверху, чтобы подача происходила под действием собственного веса.

#### **6.6. РО для нанесения покрытий на поверхности изделий**

При окрашивании поверхностей РО служит краскораспылитель. При пневматическом окрашивании распыление краски осуществляется за счет подачи сжатого воздуха. Краска самостоятельно поступает из бака большой емкости, вследствие разряжения в камере при истечении из сопла струи смеси краски с воздухом. Для подобных краскораспылителей, широко применяемых при ручной и автоматической окраске, расстояние до окрашиваемой поверхности составляет обычно 200...300 мм, угол распыления зависит от состава краски и составляет обычно 40...80°. При пневматическом распылении, которое считают наиболее простым технологически, имеют место, большие потери лакокрасочных материалов.

Другой способ – безвоздушное распыление, отличается тем, что распыление в сопле происходит без сжатого воздуха, только за счет большого давления (14...15 МПа), под которым подается подогреваемый лакокрасочный материал.

сочный материал. Давление обычно создают шестеренчатым насосом. При безвоздушном распылении значительно снижается расход растворителей и легче получаются утолщенные слои. Это уменьшает требуемое число повторных нанесений лакокрасочного материала. Безвоздушное распыление используется преимущественно для окрашивания плоских и обтекаемых поверхностей.

Все краскораспылители, установленные на роботах, имеют быстродействующие клапаны с пневматическим или электромагнитным управлением. Имеются приспособления для быстрой очистки сопла без разборки. Некоторые краскораспылители приспособлены для окрашивания распылением в электростатическом поле высокого напряжения. При этом наконечник краскораспылителя, хорошо изолированный от корпуса, подключается к высокому напряжению, а окрашиваемое изделие заземляется.

При выходе из сопла частицы распыленного лакокрасочного материала заряжаются, притягиваются к нему и поэтому, огибая его, покрывают с боковых сторон и частично сзади. При этом значительно снижается расход материалов, можно упрощать движения при окраске и не подводить краскораспылитель со всех сторон. Можно также допускать большие колебания сопла относительно требуемого положения и направления.

Производительность краскораспылителей оценивается расходом краски. Обычно расход составляет доли килограмма в минуту. Для повышения производительности окрашивающий рабочий орган может быть комбинированным. Т.е., содержать несколько краскораспылителей, включаемых и выключаемых одновременно или независимо. Как и для других технологических органов, практические трудности представляет размещение и закрепление шлангов, особенно при безвоздушном распылении, когда вследствие высокого давления шланги должны быть высокопрочными.

При распылении в электростатическом поле трансформатор высокого напряжения располагают вблизи краскораспылителя. При этом приходится принимать специальные меры для предотвращения пробоев и обеспечения электробезопасности. Для нанесения других покрытий с высокой вязкостью материалов (эмалей, мастик, грунтов, шпатлевки) используют такие же распылители, но они работают при повышенном давлении и с подогретыми материалами.

## **6.7. Рабочие органы-дозаторы**

Существуют рабочие органы для дозированной выдачи жидких и вязких материалов, например, для впрыскивания смазки в отверстия и т. п. Отличительной особенностью таких технологических задач является необходимость быстрого выдавливания из специального контейнера малых, вполне определенных порций материала. Контейнер представляет собой цилиндр, полость которого под поршнем целиком заполнена материалом. Поршень перемещается через передачу гайка-винт от шагового двигателя.

Программируемым поворотом ротора шагового двигателя задается вполне определенное смещение поршня и, следовательно, вполне определенный объем выдавливаемого материала. Выходное отверстие контейнера может соприкасаться с поверхностью, но между ними может также быть определенный зазор. Распространены также дозаторы с пневматическими двигателями. Контейнер часто представляет собой самостоятельное устройство, которое непосредственно крепится к руке робота, но иногда контейнер устанавливается в специальный хват, тогда облегчается его замена. Массогабаритные характеристики дозаторов могут быть самыми различными в зависимости от назначения.

## **6.8. Контрольно-измерительные РО**

Контрольно-измерительные роботы и их РО не относятся к технологическим роботам. Они образуют самостоятельную группу. Но их рассмотрим, так как в дальнейшем будут рассмотрены захватные устройства роботов.

Для координатно-измерительных машин рабочим органом является щуп или другое устройство, которое выдает электрический сигнал при касании поверхности измеряемого изделия или при приближении к нему на заданное расстояние. Щуп не является самостоятельным средством измерения или контроля, он лишь фиксирует факт касания, и в этот момент времени регистрируются отсчеты координат, получаемые по сигналам датчиков перемещений, находящихся на звеньях самого манипулятора. После этого устройство управления дает команды приводам переходить на определение координат следующей точки. В других случаях рабочий орган представляет собой датчик (первичный измерительный преобразователь), он непосредственно выдает измерительную информацию, которая используется сама по себе или преобразуется в специальном вычислительном устройстве. При этом манипулятор играет роль просто носителя дат-

чика, он переносит его в заданное место и, если это необходимо, прикладывает его к изделию. В нашей стране на базе серийных вспомогательных роботов созданы и успешно работают роботизированные контрольно-измерительные комплексы разного назначения, которое определяется выбором датчика. Разработан комплекс для измерения толщины неметаллических покрытий (из пластмасс, резины и пр.) на стальном основании; при этом в качестве датчика используется магнитный толщиномер, робот по команде прикладывает его к покрытию, а результат измерения снимается со шкалы или цифрового индикатора прибора. В комплексе для измерения толщины таких же покрытий на немагнитном металлическом основании используется в качестве датчика вихретоковый толщиномер.

Для измерения толщины стенки изделия (например, трубы) в комплекс включается ультразвуковой толщиномер. Для выявления дефектов (трещин, раковин и пр.) применяются ультразвуковые и рентгеновские дефектоскопические устройства. Могут быть использованы специальные датчики для контроля качества термообработки, однородности смесей в деталях из композитных материалов, степени намагниченности и т. д. Часто необходимо по результатам контроля деталей производить их оперативную сортировку. В этих случаях стараются совместить датчик с захватным устройством с тем, чтобы в зависимости от результата контроля перенести деталь в определенную тару, которая предназначена для деталей соответствующей группы. Перечисленные группы технологических рабочих органов не исчерпывают их разнообразия. Распространение областей применения промышленных роботов на новые отрасли и производства в первую очередь требует расширения номенклатуры рабочих органов, а манипуляторы, по крайней мере, в первое время используются серийные.

## **7. Процесс манипулирования объектами**

### **7.1. Классификация объектов манипулирования**

Роботизация производственных процессов – это способ автоматизации производства, основанный на применении ПР, что определяет большое разнообразие объектов манипулирования: предметов производства, инструмента, технологической оснастки.

Основными классификационными признаками объектов манипулирования являются: физическое состояние, форма, свойства симметрии, подвижность и ориентация в момент захватывания.

*По физическому состоянию* объекты могут быть жидкими, сыпучими или твердыми. Как правило, объекты являются твердыми и жесткими, но они могут быть упругими, хрупкими или пластичными. *Твердыми* считаются такие объекты, которые в разумных пределах не требуют наложения каких-либо ограничений сверху на контактные усилия. *Жесткими* – объекты, деформациями которых в процессе захватывания и переноса заведомо можно пренебречь. Объекты могут представлять собой тела самой *разнообразной формы* сечения, при обслуживании кузнечно-прессового оборудования – плоскую или коробчатую форму. Применительно к задачам захватывания и удерживания объекта схватом, важное значение имеют особенности формы поверхностей, по которым производится захватывание, наличие точек, осей и плоскостей симметрии, распределение инерционных характеристик по осям объекта (оно различно для плоских, удлиненных и объемных объектов). Для объектов сложной формы может быть существенно наличие отверстий, выступающих штырей, облоя и др.

При описании объекта важно знать, неподвижен объект во время захватывания или он находится на непрерывно движущемся транспорте. Часто имеет место ситуация, когда объект в момент захватывания фиксируется в специальных зажимных приспособлениях или же может перемещаться по некоторым из направлений (например, когда объект расположен на плоскости, в гнездах, пазах, насажен на штыри и т. п.). Дополнением к данной классификации могут служить соображения, изложенные в работах.

Набор количественных показателей для объектов различных классификационных групп формируется из числа следующих.

- Габаритные размеры.
- Положение и ориентации осей, линий и поверхностей.
- Диапазоны изменения погрешностей формы и положения поверхностей; диапазоны изменения погрешностей установки.
- Масса и другие инерционные характеристики.
- Допустимые значения контактных усилий.

В каждом конкретном случае возможно расширение перечня.

При постановке требований к способу и особенностям захватывания следует определить желаемые направления подхода схвата к объекту, указать поверхности, по которым целесообразно производить захватывание, установить его способ. Может быть предложена более детальная классификация по этому признаку. Часто при работе с деталями различных размеров, но сходными по форме, захватывание необходимо осу-

ществлять таким образом, чтобы положение некоторых характерных осей, плоскостей или поверхностей объекта оставалось неизменным относительно основания схвата.

Условия работы схвата могут быть квалифицированы как нормальные или аномальные, отличающиеся повышенным или пониженным уровнем или интенсивностью факторов воздействий, в частности температуры, давления, влажности, запыленности, вибраций, концентраций в среде активных химических веществ, радиоактивности и др. Вид объекта манипулирования во многом определяет тип и конструктивные особенности схвата, прежде всего поверхностей его рабочих элементов, вступающих в непосредственный контакт с объектом. Исходя из особенностей работы ПР с объектом, строится классификация рабочих элементов схвата. Основными классификационными признаками являются: геометрические особенности, свойства поверхности, конструктивные особенности и кинематика движения рабочих элементов.

*Геометрические особенности рабочих элементов схвата* включают в себя общие особенности формы и степень согласованности формы рабочих элементов с формой объекта.

*По общим особенностям формы* рабочие элементы могут быть простейшей формы (образованные плоскостями, призматическими или цилиндрическими поверхностями), с выступающими ребрами или штырями, сложной формы.

*По степени согласованности с объектом* могут быть выделены согласованные рабочие элементы, форма которых полностью совпадает с формой объекта (факсимильные элементы), рабочие элементы полусогласованной формы и рабочие элементы несогласованной формы.

*По свойствам поверхностей* рабочие элементы разделяют на гладкие, с насечкой, с накладками, с роликами. Насечка или накладки наносятся на поверхности рабочих элементов схвата для увеличения сил трения в точках или зонах контакта, введение роликов преследует обратную цель – снижение значений сил трения. Кроме того, накладки вводятся для уменьшения износа поверхностей рабочих элементов, улучшения условий контакта с объектом, обеспечения сохранности объекта.

При классификации *по конструктивным особенностям* в качестве основных признаков выделяются: способ крепления, варируемость формы, реализация специальных решений. Рабочие элементы крепятся к основанию схвата или к одному из звеньев механизма передачи,

они могут иметь фиксированную форму или форму, регулирующую вручную или автоматически. В ряде случаев рабочие элементы выполняются сдвоенными, удлиненными, разнесенными и др.

Они перемещаются либо симметрично относительно оси или плоскости, либо с заданным отношением, совершая поступательное или вращательное движение.

Описание разработанных и используемых конструкций схватов показывает, что большинство перечисленных вариантов признаков реализуется на практике, но предпочтительными являются немногие их сочетания.

Для существующего парка ПР чаще всего применяются схваты с рабочими элементами простейших форм, несогласованные с объектом, перемещающиеся симметрично относительно средней плоскости схвата. В ряде случаев поверхности рабочих элементов изготавливаются с насечкой, оснащаются накладками.

Разработанные процедуры анализа совокупностей исходных данных об объекте манипулирования и условиях эксплуатации и характерных особенностях схвата имеют значение при проектировании схватов на этапе выбора схемных решений и характерных параметров.

## **7.2. Требования к изделию и оборудованию РТК**

При создании РТК и выборе номенклатуры используемых ЗУ необходимы технологический анализ конструкций изделий и группирование изделий по конструктивно-технологическим признакам. В РД 50-357-82 «Методические указания. Правила выбора объектов роботизации» приведены результаты такого анализа и установлены требования к конструкции выпускаемых изделий, которые сводятся к следующему. Детали, подлежащие обработке на РТК должны обладать возможностью группирования по ряду признаков:

- по конструктивно-технологическому сходству деталей в целом; типовыми совокупностями в этом случае являются группы шестерен, валов, шпинделей и др.;
- по элементарным поверхностям деталей, что позволяет установить единообразные варианты обработки этих поверхностей, а из комбинации этих вариантов получить совокупный технологический процесс обработки любой детали;
- по видам обработки (типам оборудования), единству технологического оснащения и общности настройки станков.

Такое разделение необходимо для применения групповой формы организации производственных процессов обработки и использования однородного основного и вспомогательного оборудования.

Это позволяет иметь:

- явно выраженные базы и признаки ориентации, позволяющие организовать их транспортирование, складирование в ориентированном виде с использованием стандартизированной оснастки;
- однородные по форме и расположению поверхности для базирования и захватывания, позволяющие без дополнительной выверки устанавливать детали в принимающие устройства обрабатывающего оборудования, где для их базирования и закрепления может быть применена универсальная технологическая оснастка.

При использовании ПР на операциях перемещения и при вспомогательных переходах группирование деталей по конструктивно-технологическим признакам должно способствовать сокращению номенклатуры применяемых захватных устройств за счет применения широкодиапазонных схватов. Переход от одних типоразмеров деталей к другим в пределах одного роботизированного технологического комплекса должен сопровождаться минимальным количеством смен захватных устройств и других переналадок ПР.

РТК, как правило, создаются для обработки деталей простейших форм. Характеристики групп деталей с указанием возможного способа захватывания приведены в РД 50-357-82.

Выделены семь основных групп деталей общемашиностроительного применения: I – тела вращения, длина которых не превосходит удвоенного диаметра; II– детали, длина которых больше удвоенного диаметра; III– коробчатые детали; IV– фигурные детали; V–изогнутые детали; VI–плоскостные детали; VII–детали арматуры.

РД 50-357-82 устанавливает следующие размерные и весовые характеристики указанных групп деталей. Диаметр  $D$  и длина  $L$  детали (мм), а также масса  $m$  детали группы I удовлетворяют неравенствам:

$$D < 160 \text{ мм}, L < 320 \text{ мм}, m < 40 \text{ кг};$$

$$D < 250 \text{ мм}, L < 500 \text{ мм}, m < 80 \text{ кг};$$

$$D < 320 \text{ мм}, L < 640 \text{ мм}, m < 160 \text{ кг};$$

$$D < 400 \text{ мм}, L < 800 \text{ мм}, m < 250 \text{ кг};$$

$$D < 620 \text{ мм}, L < 1250 \text{ мм}, m < 320 \text{ кг}.$$

Диаметр (ширина)  $B$ , длина  $L$ , высота  $H$  деталей группы III соотносятся с массой в соответствии со следующими неравенствами:

$B < 300 \text{ мм}, L < 300 \text{ мм}, H < 300 \text{ мм}, m < 40 \text{ кг};$

$B < 500 \text{ мм}, L < 500 \text{ мм}, H < 500 \text{ мм}, m < 160 \text{ кг};$

$B < 800 \text{ мм}, L < 800 \text{ мм}, H < 800 \text{ мм}, m < 250 \text{ кг};$

$B < 1000 \text{ мм}, L < 1000 \text{ мм}, H < 1000 \text{ мм}, m < 500 \text{ кг}.$

Аналогичные соотношения для деталей остальных групп:

$B < 300 \text{ мм}, L < 300 \text{ мм}, H < 60 \text{ мм}, m < 20 \text{ кг};$

$B < 500 \text{ мм}, L < 500 \text{ мм}, H < 100 \text{ мм}, m < 40 \text{ кг};$

$B < 800 \text{ мм}, L < 800 \text{ мм}, H < 160 \text{ мм}, m < 80 \text{ кг};$

$B < 1000 \text{ мм}, L < 1000 \text{ мм}, H < 280 \text{ мм}, m < 160 \text{ кг}.$

**Основное технологическое оборудование** должно обеспечивать:

- полную автоматизацию цикла обработки детали;
- точное базирование заготовки, автоматизацию ее фиксации и зажима в рабочей зоне обрабатывающего оборудования;
- отделение отходов от обрабатываемой детали (дробление и смыв стружки, сбрасывание пресс-остатка и др.), механизацию или автоматизацию их уборки;
- очистку поверхностей базирующих и крепежных приспособлений от отходов после каждого цикла обработки.

Основное оборудование должно иметь:

- форму и расположение рабочей зоны, позволяющие работать совместно с ПР, обеспечивающие безопасность работы и удобный доступ оператора к органам управления; высокую производительность;
- высокий уровень концентрации и совмещения операций;
- устройства контроля наличия детали в рабочей зоне обрабатывающего оборудования, правильности ее базирования и расположения в зажимных приспособлениях, а также контроля технологических параметров обработки.

**Вспомогательное, транспортно-накопительное оборудование**, формирующее РТК или осуществляющее связь с ним, должно иметь возможность работы в автоматическом режиме по сигналам, получаемым от ПР, основного технологического оборудования или устройства управления более высокого уровня. В зависимости от технического решения и выполняемых задач оборудование должно обеспечивать:

- накопление определенного числа ориентированных заготовок на начальной позиции;
- поштучную выдачу заготовок на определенную позицию для взятия захватным устройством ПР;
- транспортирование изделий с одной рабочей позиции на другую; переориентацию изделий; хранение межоперационного задела.

При создании групп принимается во внимание вид производимых

работ. Например, на сборочных работах основными признаками классификации являются общность схемы сборки, характер сборочных соединений, габаритные размеры, степень точности сборки, характер методов испытаний и контроля и др. На станочных операциях выделяют такие признаки, как конструктивное подобие деталей, элементы обрабатываемых поверхностей, размеры, точность изготовления, характер используемого оборудования, вид обрабатываемой заготовки и др.

### 7.3. Концепция схвата – от человека к роботу

#### 7.3.1. Предмет берет человек

Процесс захватывания предмета для человека состоит в выборе способа захвата рукой и взятия его под контролем положения. Реакция на внешние или внутренние события вырабатывается через органы зрения и мозг. Человек приближает свою руку к объекту, производит захватывание и выполняет намеченные действия. Управление движением (УД) человека осуществляется по двум контурам обратной связи.

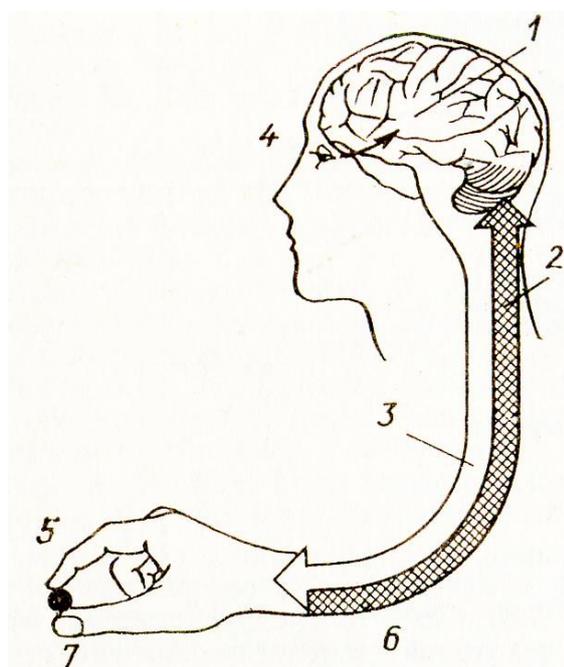


Рис. 7.1.

Зрением контролируется положение руки. Осязанием корректируются сила сжатия пальцев.

На рис. 7.2 показана обобщенная функциональная схема систем управления движениями тела человека, в которые входят пассивная часть – скелет, ее активная (движущая) часть – мышцы, чувствительные устройства – рецепторы и информационно-управляющая система – центральная нервная система (ЦНС).

Скелет (его часть, которая участвует в движении) представляет собой вместе с мышцами объект управления в виде подвижно соединенных костных

звеньев, образующих с позиций механики многозвенные кинематические цепи, подобные манипуляторам роботов. Управление этим объектом осуществляет ЦНС на основе информации, получаемой от рецепторов. Основное назначение этой системы управления – поддержание позы, ориентация (во внешней среде), перемещение тела в пространстве – локомоции и, наконец, манипуляции.

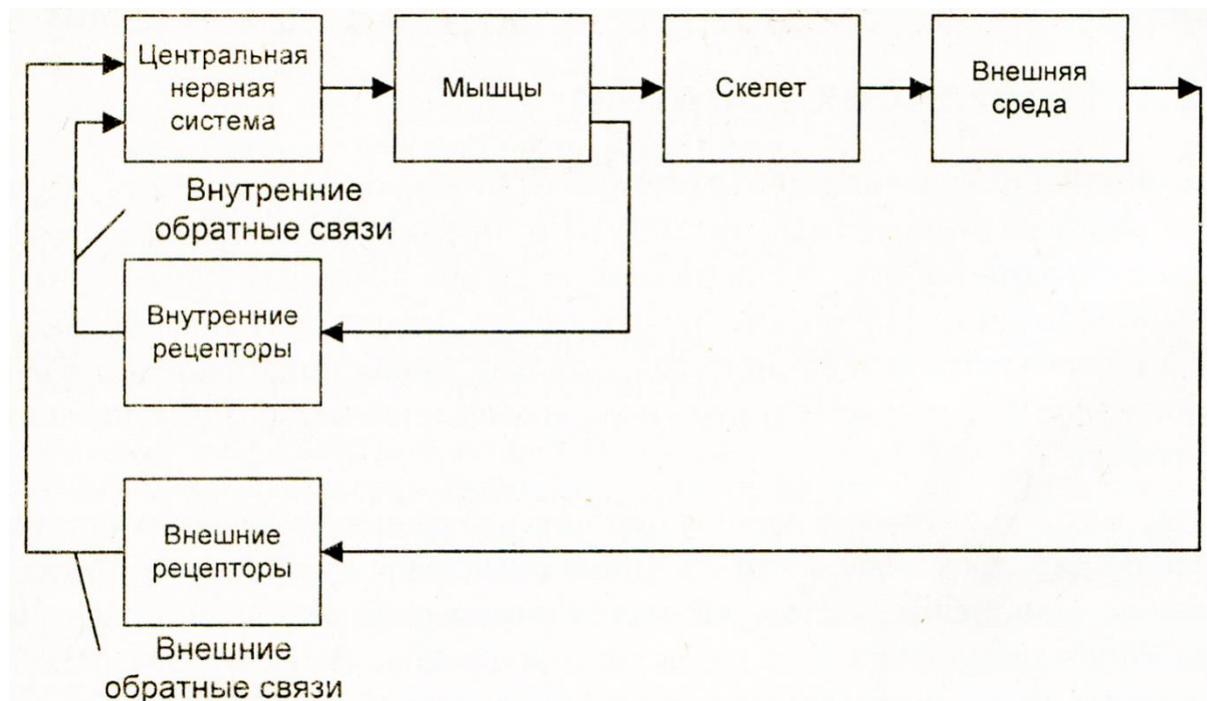


Рис. 7.2.

**Нейроны** – нервные клетки человека. Они являются "элементной базой" системы управления. Известно много типов нейронов для восприятия внешней информации, ее преобразования, хранения, передачи и воздействия на мышцы. В организме человека миллиарды нейронов соединены в нейронную сеть, охватывающую все тело.

На рис. 7.3 изображено строение нейрона (1 – дендриты; 2 – синапсы; 3 – аксон; 4 – аксонный холмик; 5 – синапс другой клетки; 6 – сома – тело клетки).

Нейрон имеет несколько входов, на которые поступают сигналы от других нейронов через отростки тела нейронов – **дендриты**, и один разветвленный выход – **аксон**. Его соединения с дендритами других нейронов осуществляются через утолщения – **синапсы**.

Сигналы на входе и выходе – электрические импульсы. Их интенсивность определяется частотой следования и величиной. Сигналы могут быть возбуждающими или тормозящими. Выходной сигнал является

нелинейной функцией суммы входных сигналов, которые алгебраически складываются с различными весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты могут быть заданы генетически или устанавливаться в процессе функционирования под воздействием других нейронов. При превышении суммарным входным сигналом порога нечувствительности нейрона последний возбуждается и генерирует выходной импульс, который распространяется по аксону.

В местах соединения аксона с дендритами других нейронов – синапсах – происходит химический процесс преобразования выходного импульса во входные импульсы для этих нейронов. Кроме таких связей аксон-дендрит, в нейронной структуре существуют еще связи аксон-аксон и дендрит-дендрит. Это существенно увеличивает возможности обработки информации, т. к. количество синапсов на порядок больше числа нейронов.

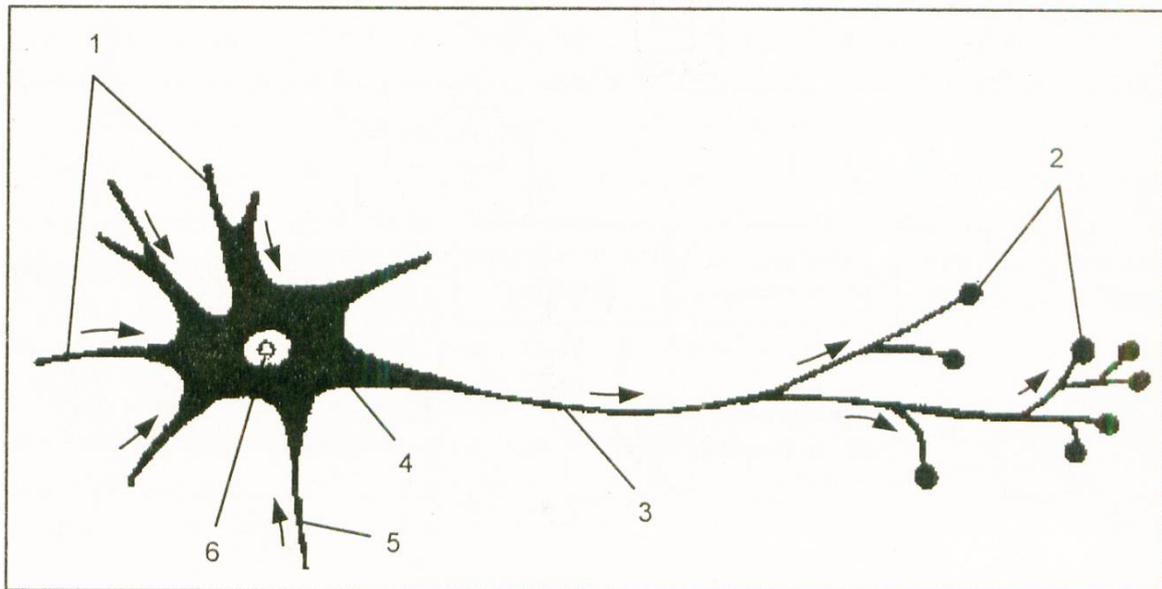


Рис. 7.3.

Длина аксонов отдельных нейронов соизмерима с размерами тела человека (например, аксоны идут от спинного мозга до пальцев ног). Один нейрон может иметь тысячи входов от других нейронов и сотни разветвлений выхода через синапсы. Возбуждение по аксону передается в виде импульсов величиной в десятки милливольт и длительностью примерно 1 мс со скоростью 50...100 м/с. После каждого возбуждения нейрону требуется определенное время для возвращения в исходное состояние. Это так называемый *рефракторный период*. Аксоны нейронов объединяются в пучки, образуя стволы или нервы.

На рис. 7.4 показана обобщенная схема нейронной системы управления движением, которая выполняет информационно-управляющие функции. Она обрабатывает информацию, получаемую от "органов чувств" (сенсорных систем), формирует и корректирует модель внешней среды, обеспечивая ее соответствие текущей ситуации, вырабатывает адекватные решения (реакции) в виде заданий на определенные действия и контролирует их выполнение.

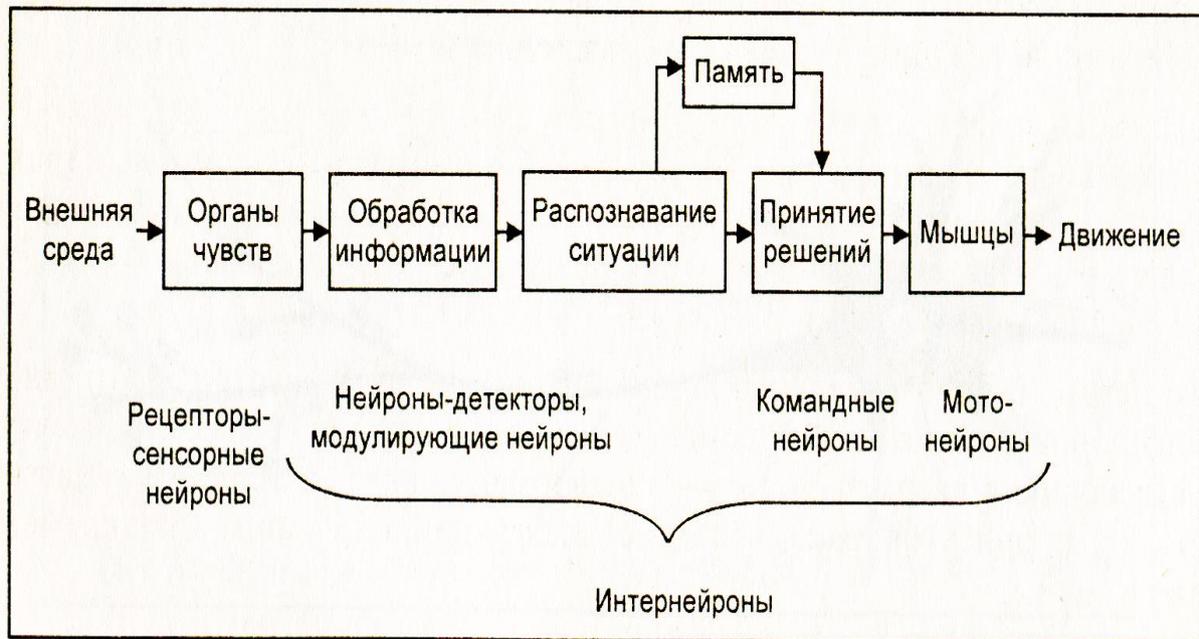


Рис. 7.4.

Нейронная система состоит из последовательных слоев нейронов, которые реализуют уровни обработки информации. В *рецепторах* органов чувств осуществляется параллельная первичная обработка входной информации слоями сенсорных нейронов. Между рецепторами и *мотонейронами*, которые приводят в действие мышцы, находятся слои *интернейронов* (отсюда их название). Они включают слои *нейронов-детекторов* и *командных нейронов*. Между ними находятся еще *модулирующие нейроны*. Нейроны-детекторы послойно последовательно выявляют отдельные объекты, события, а затем по их сочетанию распознают ситуацию в целом. (Например, при распознавании букв вначале выделяются их отдельные части, а затем по сочетанию последних определяются сами буквы.)

Модулирующие нейроны устанавливают интенсивность реакции на внешнюю ситуацию. Она осуществляется воздействием синапсов этих нейронов на синапсы последующих нейронов-детекторов и задается верхними уровнями нейронной структуры, ответственными за общее функцио-

нирование организма и формирование основных стимулов поведения (оборонительные, пищевые и т. д.)

Командные нейроны задают через мотонейроны конкретную двигательную реакцию на ситуацию, определенную нейронами-детекторами. Она реализуется в результате возбуждения, передаваемого от соответствующей комбинации возбужденных нейронов-детекторов определенной совокупности командных нейронов, ответственных за эту реакцию.

Совокупность возбужденных мотонейронов обеспечивает целостную поведенческую реакцию, адекватную выявленной ситуации. Командные нейроны образуют моторную кору головного мозга, которая охватывает все множество реакций организма на различные возможные ситуации.

Память, показанная на рис. 7.4, представляет собой нейронные слои, повторяющие слои нейронов-детекторов. Это память оперативная, наряду с ней существует постоянная память, в том числе и генетическая синаптическая. Извлечение информации из памяти – ассоциативное и связано с внешними ситуациями и реакциями на них. Нейронные слои, начиная со слоев рецепторных нейронов и вплоть до командных нейронов моторной коры, образуют сужающиеся кверху колонки – "информационные единицы", каждая из которых ориентирована на совместное функционирование в конкретной ситуации. В медицинской литературе описано восемь основных типов захватов руки человека. Практическое значение для промышленности имеют только два из них: захват «тремя пальцами» (рис. 7.5) и «обхватывающий» захват, используемый при работе отверткой или молотком.

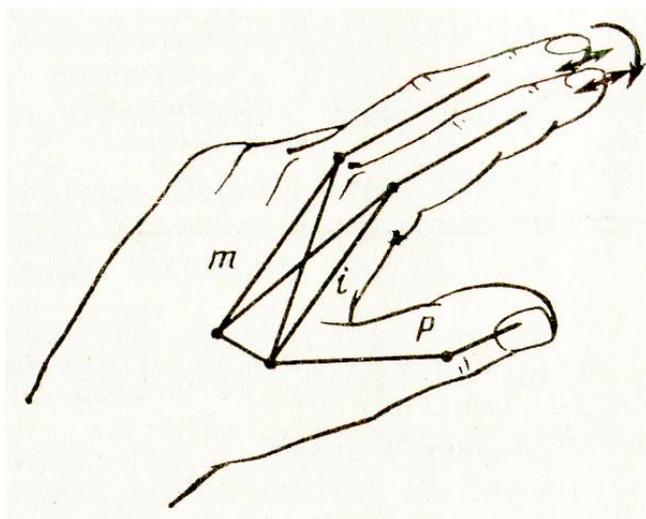


Рис. 7.5.

В 90 % бытовых и производственных операций, не требующих больших усилий, используется захват тремя пальцами. Он применяется для захвата предметов разной величины (от горошины до теннисного мячика) и обеспечивается сокращением расположенной на обратной стороне ладони группы мышц. Но он не такой прочный, как обхватывающий захват,

при котором большую роль играет трение между поверхностями всех пальцев и инструментом, а также используется сила всех пяти

пальцев и очень сильной мышцы, связывающей мизинец с предплечьем через нижний край ладони.

### 7.3.2. Предмет берет робот

Процесс захвата промышленным роботом определяется целью и ведущую роль играет выбор захвата. На упрощенной блок-схеме (рис. 7.6) отражены основные действия, составляющие процесс захватывания предмета роботом, и взаимосвязи между ними.

По аналогии с человеческой витальностью, прототипом нейронной сети для ПР был перцептрон, предложенный Ф. Розенблаттом, который состоит из чувствительных S-элементов, случайно связанных с ассоциативными A-элементами. Они через усилители Y соединены с реагирующими D-элементами (рис. 7.7).

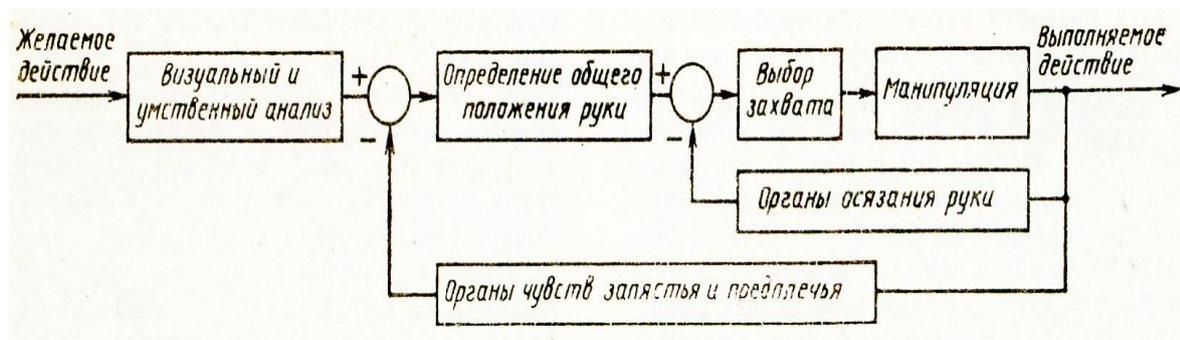


Рис. 7.6.

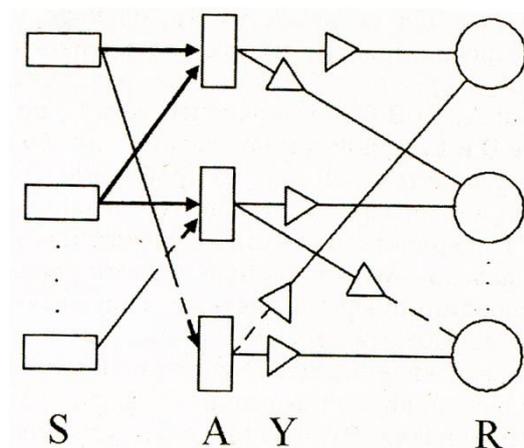


Рис. 7.7.

Выход A-элемента отличается от нуля, если на его входе включилось несколько S-элементов. Некоторая комбинация выходов A-элементов после их усиления распознается D-элементом как определенный образ. При обучении перцептрона S-элементы воспринимают некоторые образы, для каждого из которых известен класс R.

Если для i-го образа включился элемент  $R_i$ , то «поощряют» правильное решение, увеличивая коэффициенты усиления усилителей в соответствующих связях. Если включился другой элемент, то коэффициенты усиления

уменьшают до выключения  $R$ -элемента.

После такого обучения перцептрон способен самостоятельно распознавать неизвестные образы с некоторой вероятностью ошибочного распознавания. Вскоре исследования показали, что перцептроны могут решать лишь ограниченный круг задач. Тем не менее, их идея стала далее развиваться в нейронных сетях.

Нейронная сеть состоит из множества взаимосвязанных нейронов, имитирующих нейроны человеческого мозга. Связи между нейронами имеют разные весовые коэффициенты, которые задают в процессе обучения нейронной сети. Нейрон может быть представлен как соединение адаптивного сумматора с нелинейным преобразователем (рис. 7.8).

Значения признаков среды  $x_1...x_n$  подаются к входу адаптивного сумматора через усилители с настраиваемыми коэффициентами усиления  $a_1...a_n$ . Адаптивный сумматор складывает произведения сигналов на весовые коэффициенты и передает сумму в нелинейный преобразователь  $\varphi$ . Нелинейный преобразователь по величине суммы определяет, к какому классу принадлежит ситуация, заданная значениями признаков  $x_1...x_n$ . Его выходной сигнал подается на входы других нейронов или к исполнительному устройству робота.

Таким образом, *нейронная сеть, получившая на входе множество значений признаков среды и состояния робота, после их обработки нейронами способна распознать неизвестную технологическую ситуацию по заданным весовым коэффициентам входных сигналов.*

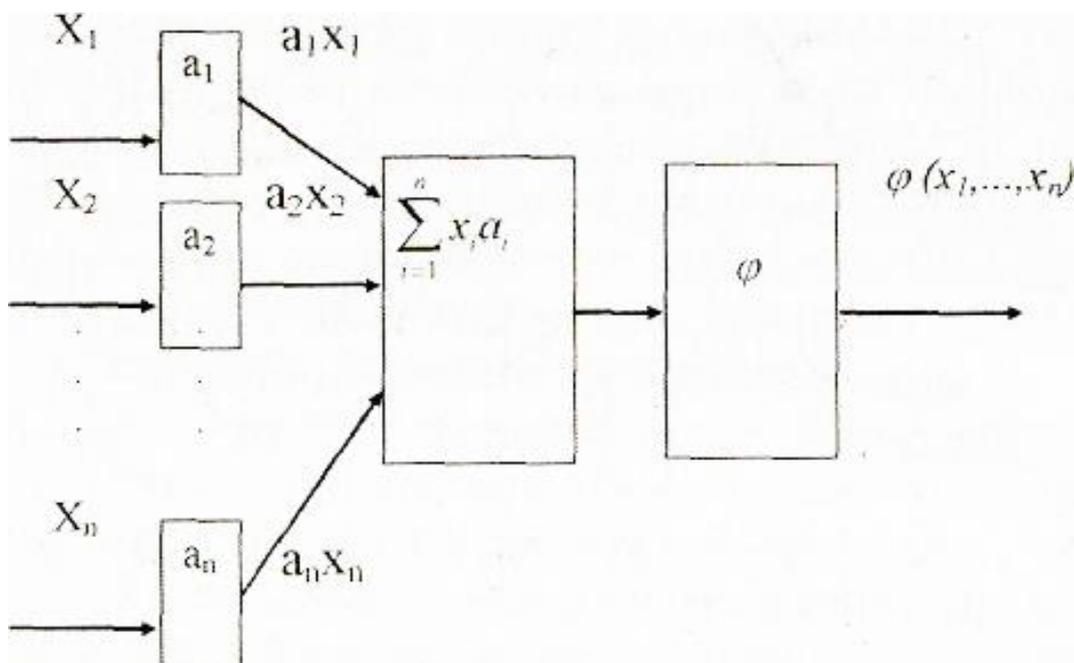


Рис. 7.8.

Обучение нейронной сети сводится к настройке весовых коэффициентов так, чтобы определенному набору ситуаций соответствовало одно решение. Если задаются однозначные связи «ситуация-решение», то обучение организуется автоматически.

Для улучшения качества распознавания нейронные сети строят из нескольких слоев. Нейроны первого слоя получают значения признаков ситуаций и после преобразования передают результаты первичной обработки следующему слою. Каждый выходной сигнал каждого нейрона поступает на вход каждого нейрона следующего слоя. Последний слой формирует решение, т.е. к какому классу отнести данную ситуацию.

Таким образом, *на основе предварительного обучения системы управления, построенной в виде нейронной сети, осуществляется распознавание роботом неизвестных ситуаций.*

Фаззи-системы преобразуют числа в лингвистические переменные. Для этого используют функцию принадлежности элемента  $x$  множеству  $M$ , полученную с помощью экспертов. Если  $f(x) = 0$ , то  $x$  не принадлежит множеству  $M$ ; если  $f(x) = 1$ , то  $x$  точно принадлежит  $M$ . В промежутке между 0 и 1 значение функции понимается как степень уверенности экспертов в том, что  $x$  принадлежит  $M$ . Понятие «близко» отображается значениями функции принадлежности:

- $f(x)=1$  для расстояния 1,5 м;
- $f(x) = 0,8$  для 2,5 м;
- $f(x) = 0,05$  для 10 м.

Это позволяет сократить число переменных для описания среды функционирования робота. При фаззи-регулировании точное значение измеряемой переменной с помощью функции принадлежности преобразуют в лингвистическое понятие, принимают соответствующее решение в виде лингвистического понятия и с помощью другой функции принадлежности преобразуют решение в точную команду.

Ситуационные модели представления знаний основаны на обобщении знаний путем наблюдений за работой оператора. Система ситуационного управления (рис. 7.9) содержит блок восприятия, анализатор, коррелятор, классификатор и экстраполятор.

На этапе обучения оператор вводит в память классификатора пары «ситуация-решение». Для этого используют двухвходовую обучающую таблицу. В её левой части записывают набор признаков, а в правой – решение. Ситуация – это набор признаков, связанных пространственно-временными отношениями типа «быть одновременно», «находиться

вперед» и т.п. В классификаторе формируют и хранят правила обобщения ситуаций. Обобщенные классификатором ситуации записывают в анализатор, а пары «обобщенная ситуация-команда управления» записывают в коррелятор.



Рис. 7.9.

Экстраполятор выбирает оптимальное решение из нескольких вариантов, прогнозируя развитие процесса. На этапе управления блок восприятия передает в анализатор набор состояний признаков, описывающий текущую ситуацию.

Если ситуация встречалась при обучении, то ее передают в коррелятор, который отыскивает соответствующую команду и через экстраполятор переключает исполнительные устройства робота. Если ситуация неизвестна, она передается в классификатор, который путем последовательных обобщений относит ее к одному из классов известных ситуаций и передает в коррелятор. Основная проблема состоит в правильном обобщении множества ситуаций по классам, число которых соответствует решениям, принимаемым оператором.

Блок информации воспринимает информацию о мире с помощью системы технического очувствления или распознавания команд человека на естественном языке. Чаще всего систему технического очувствления строят на основе технического зрения. С ее помощью решают задачи распознавания образов или анализа сцен.

При распознавании образов конкретное изображение объекта относят к некоторому классу объектов, отличающихся общими признаками. Затем этому изображению присваивают обобщенное название класса. Такие задачи решают при распознавании неизвестных объектов. В задаче анализа сцен определяют взаимное расположение объектов на поле наблюдения. Такие задачи часто решают при сборке изделий с помощью роботов, где сначала требуется распознать объекты, а затем собрать их в изделие.

Система восприятия должна обладать константностью, т.е. способностью выделять целостный образ объекта при изменении расстояния, ракурса или условий освещения, а также избирательностью – способностью выделять только те свойства объекта, которые необходимы для решения поставленной задачи. Зрительное восприятие объектов реализуется по одной из следующих схем:

- обработка полного изображения объекта на некотором фоне;
- выделение структурных элементов изображения объекта и их преобразование в сеть с вершинами (элементами изображения) и дугами (отношениями между элементами);
- выделение элементов изображения по их яркости и отдельная обработка элементов.

Преобразование естественного языка человека в машинный язык осуществляют с помощью лингвистического процессора в четыре этапа:

**ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЯЗЫК ⇒ Морфологический анализ ⇒ Синтаксический анализ ⇒ Семантический анализ ⇒ Прагматический анализ ⇒ МАШИННЫЙ ЯЗЫК**

На этапе *морфологического анализа* выделяют основу каждого слова и путем его сопоставления со словарем делают вывод о правильности слова, относят к соответствующей грамматической группе – существительному, глаголу, наречию и т.п. При *синтаксическом анализе* строят структуру предложения, в котором должно быть подлежащее, сказуемое и второстепенные члены предложения. На этапе *семантического анализа* происходит понимание смысла предложения по его структуре. Для этого обращаются к логической или сетевой модели знаний о среде. Имеющая смысл фраза проходит этап *прагматического анализа*, на котором ее оценивают с позиции решаемой задачи. Так, фраза «В рабочей зоне человек» оценивается, если человек находится на пути движущегося робота и робот должен принимать решение: подать сигнал или остановиться.

Задача планирования действий интеллектуального робота состоит в том, чтобы создать такую последовательность этих действий, которая обеспечит кратчайший путь к достижению намеченной цели. Например, интеллектуальный робот должен сформировать последовательность действий по сборке готового изделия из набора деталей. Исходное размещение деталей называют начальным состоянием  $S$ , готовое изделие – целевым состоянием  $G$ , а последовательность действий робота – множеством операторов  $F$ . Планирование

действий робота по переходу от  $S$  к  $G$  называют представлением задачи в пространстве состояний.

**Условие.** Пусть на четырех площадках размещено пять кубиков «Начало $S$ ». Манипуляционный робот может перемещать по одному верхнему кубику с одной площадки на другую так, чтобы кубики образовали пирамиду со словом «РОБОТ» – «Конец $G$ » (рис. 7.10).

**Задача** состоит в формировании последовательности действий робота, обеспечивающей переход  $S \Rightarrow G$  с минимальным числом перемещений.

**Метод.** Задачу можно решить путем полного перебора всех последовательностей перемещений с выбором последовательности, обеспечивающей минимальное число перемещений. Такое решение ведет к громадному числу вариантов, каждый из которых требует анализа.

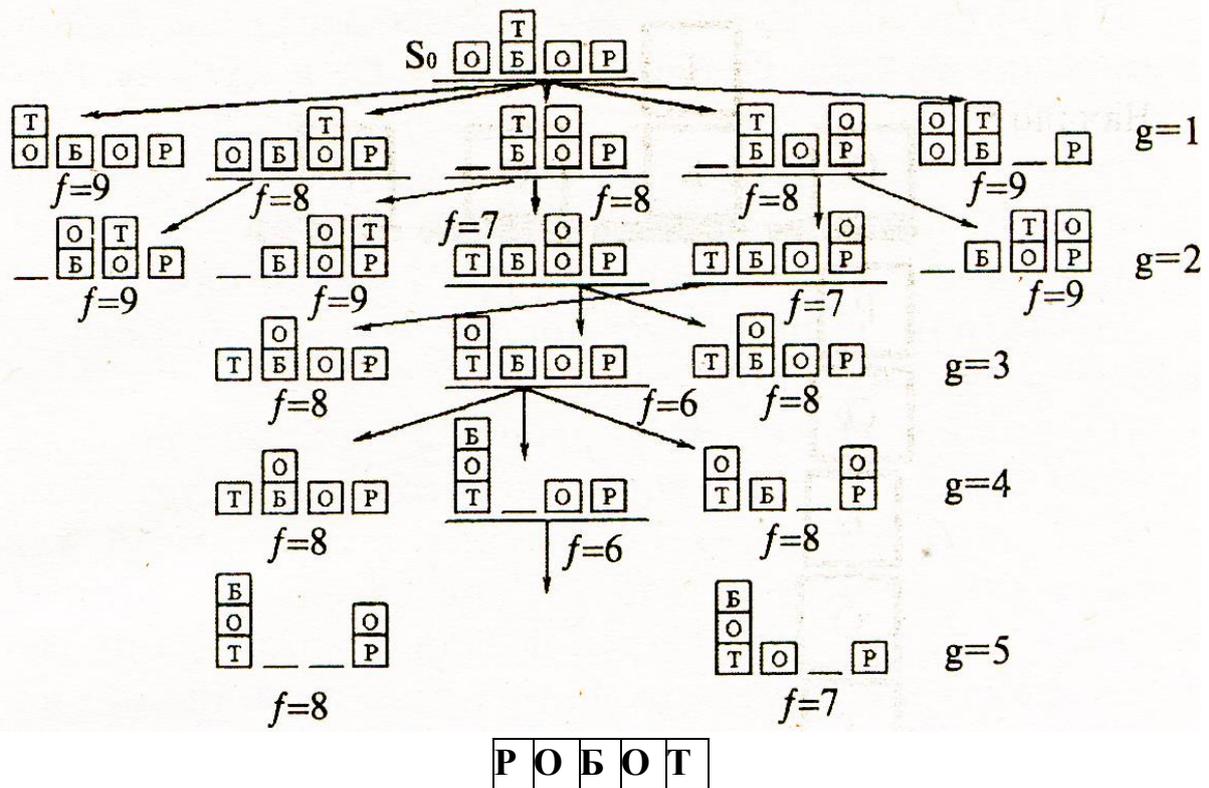


Рис. 7.10.

**Решение.** Выберем кратчайшую последовательность перемещений, используя алгоритм упорядоченного перебора. Для этого перед выбором шага по перемещению будем оценивать перспективность каждого шага с позиции достижения конечной цели.

Введем функцию оценки перспективности решения:  $f(v) = g(v) + h(v)$ , где  $g(v)$  – число шагов, пройденных от начального расположения до про-

межуточного расположения  $S;h(v)$  – сумма чисел кубиков, размещенных не на своем месте, а также количество кубиков, мешающих установке каждого из них на свое место. Оценка функции  $h(v)$  исходит из соображений эксперта. Ее называют *эвристической функцией*. Из начальной позиции возможны перестановки ( $g = 1$ ):

$f_1 = 1+5+2+1$  – не на своем месте 5 кубиков; установке кубика **T** мешают кубики **O**, **T**, а кубику **O** мешает кубик **T**.

$f_2 = 1+5+1+1$  – не на своем месте 5 кубиков; установке кубика **T** мешает кубик **O**, а кубику **O** мешает кубик **T**.

$f_3 = 1+5+1+1$  – не на своем месте 5 кубиков; установке кубика **O** мешает кубик **O**, а кубику **B** мешает кубик **T**.

Наименьшее значение функции перспективности ( $f_1 = 8$ ) имеют позиции 2,3,4. Из позиции 2 возможны позиции 2-го шага ( $g = 2$ ):

$f_4 = 2+5+1+1$  – не на своем месте 5 кубиков; установке кубика **B** мешает кубик **O**, а кубику **O** мешает кубик **T**.

Из позиции 3 возможны позиции 2-го шага ( $g = 2$ ):

$f_5 = 2+4+1$  – не на своем месте 4 кубика; установке кубика **O** мешает кубик **O**.

$f_6 = 2+5+1 + 1$  – не на своем месте 5 кубиков; установке кубика **O** мешает кубик **O**, а кубику **P** мешает кубик **T**.

$f_7 = 2+5+1$  – не на своем месте 4 кубика; установке кубика **P** мешает кубик **O**.

Наименьшее значение функции перспективности ( $f_3 = 7$ ) имеют позиции 3 и 4. Аналогично планируют последующие действия по перестановке кубиков.

Планирование действий робота возможно представлением задачи в виде теоремы, которую следует доказать. Задают множество известных утверждений или аксиом. Формулируют теорему, доказательство которой позволяет получить решение поставленной задачи. Затем выводят новые утверждения путем комбинации известных утверждений. После этого проверяют, не содержат ли новые утверждения сформулированную теорему. При отрицательном результате продолжают выводить новые утверждения до совпадения одного из них с ранее сформулированной теоремой. Задачу планирования действий можно решить путем ее последовательного разбиения до тех пор, пока не появятся мелкие задачи, для которых способ решения известен. Затем решения мелких задач объединяют до решения поставленной задачи.

## 8. Захватывающие устройства промышленных роботов

Изучен процесс распределения усилий между пальцами захвата (схвата) ПР при удержании им предмета. В общем решена задача выбора оптимального положения пальцев захватывающего устройства (ЗУ) ПР для захвата конкретного объемного тела.

Например, если известны силы сжатия пальцев и трение, то можно построить оптимальный жесткий захват, способный выдерживать значительные скручивающие усилия без проскальзывания; можно выбрать наиболее безопасное расположение трех пальцев промышленного манипулятора (рис. 8.1) для поднятия со стола детали неправильной формы.

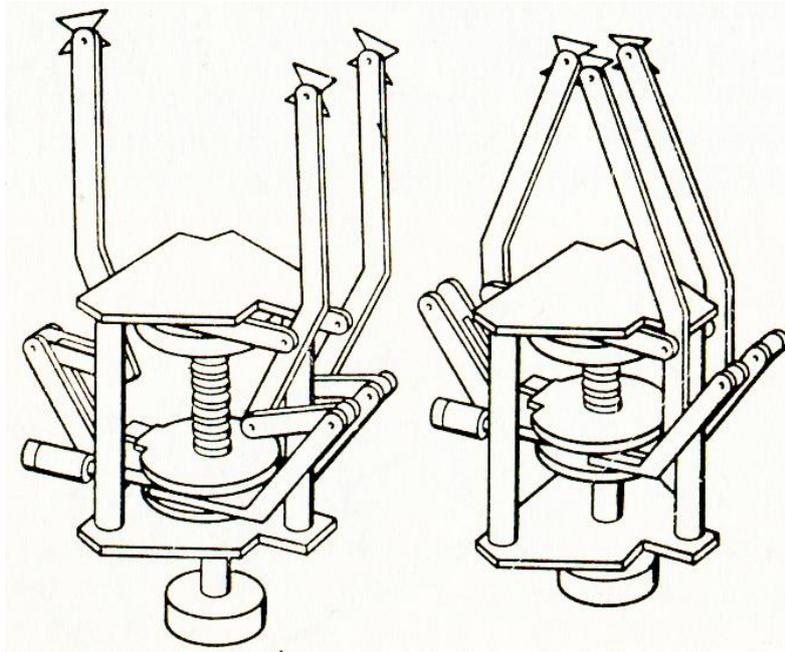


Рис. 8.1.

Принципы управления многозвонными трехпальными захватами известны. По этим принципам были построены малые манипуляторы, которые могут, в частности, навинчивать гайки на болты. Для выполнения этой операции необходимо управлять вращательным движением концов пальцев вокруг объекта. Суще-

ствует несколько вариантов построения манипуляторов с активной замкнутой системой управления пальцами. В исследовательских лабораториях было построено несколько манипуляторов этого типа. Однако манипуляторы с системой замкнутого управления пальцами вряд ли будет целесообразно применять в промышленности.

Это объясняется сложностью механической конструкции, неудобством управления пальцами и передачи информации от пальцев в устройство управления робота. Захваты современных промышленных роботов снабжены пассивными пальцами. Однако хорошая конструкция захвата с пассивными пальцами обладает большей технологической гибкостью, чем это кажется, и позволяет работать с объектами различной формы.

Упомянутые выше принципы используются и в захватах промышленных роботов (рис. 8.2 и 8.3). На рис. 8.2 изображен захват для турбинных лопаток, состоящий из трех пальцев, а на рис. 8.3 – захват для поковок неправильной формы. На рис. 8.2 снизу находится очень широкий большой палец. Два верхних пальца занимают нужное положение по отношению к захватываемой детали с помощью шарнира. Они имеют столько же степеней подвижности, как и рука человека, изображенная на рис. 7.5.

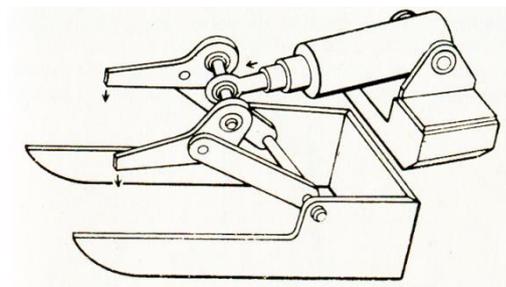


Рис. 8.2.

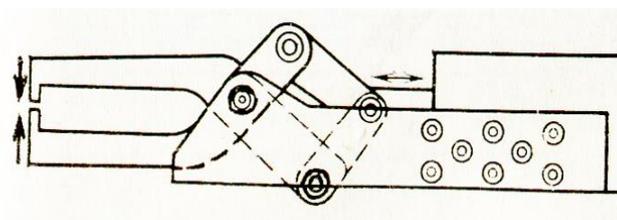


Рис. 8.3.

Конструкция (рис. 8.2), как и рука человека (рис. 7.5), имеет некоторые признаки обхватывающего захвата – расстояние между указательным и средним пальцем увеличено (по сравнению с человеческой рукой), а образующий плоскость широкий большой палец напоминает способную подхватывать снизу ладонь. В результате захват получается более надежным.

Такое сочетание двух основных типов захвата используется в конструкциях роботов для тяжелой промышленности. Недостатком такой конструкции является то, что в результате поворота пальцы смыкаются под некоторым углом, так что в закрытом состоянии захвата поверхности пальцев не параллельны.

Для захвата предметов сложной или неправильной формы требуются гибкие конструкции – захват для турбинных лопаток (рис. 8.2). Лопасти лопаток турбин имеют различные размеры и форму, но общим у них является то, что они изогнуты и сужаются от одного конца к другому. Работающий с ними захват сочетает в себе свойства захватов, характерных для человека: с тремя пальцами и с обхватывающим действием.

Приводимые в движение единым пневматическим приводом верхние пальцы затягивают лопасть на нижний палец до тех пор, пока ее край не упрется в фиксаторы. При этом лопасть занимает в захвате правильное положение. Для индикации полного закрытия верхних пальцев и упора тыльной стороны лопасти в фиксаторы используются датчики и

микровыключатели. Датчики можно поделить на три категории, различающиеся по стоимости и сложности.

**Двоичные датчики:** микропереключатели, оптические и магнитные переключатели и биметаллические термодатчики. Это дешевые, простые в изготовлении и агрегатировании с устройствами управления датчики. Обычно они используются как индикаторы наличия или отсутствия детали, для поддержания значения некоторой величины (давления, температуры и т. п.) и, в определенных пределах, как концевые переключатели.

**Аналоговые датчики:** термопары, линейно-дифференциальные преобразователи, тензометры и пьезоэлектрические датчики. Эти датчики дороже двоичных и обычно используются с измерительными приборами и аналого-цифровыми преобразователями. Как правило, они применяются для получения количественных характеристик.

**Массивы датчиков** и датчики, требующие дополнительной обработки сигнала – это расположенные на пальцах и ладони захвата массивы тактильных датчиков, массивы зрительных датчиков, пьезоэлектрические устройства с активным возбуждением. Датчики этого типа в большинстве случаев можно встретить лишь в научных лабораториях. Освоен выпуск электропроводной резины, меняющей сопротивление под давлением. Использование этих устройств связано с обработкой большого количества информации. В этой связи датчики обычно соединяются с ЭВМ (устройством управления роботом) через специальный микропроцессор.

Захват (рис. 8.3) используется в кузнечных цехах. Как и у захвата, далее изображенного на рис. 8.5, оба верхних пальца скреплены шарнирно. На примере захвата рассмотрим свойства податливости и адаптивности, характерные для гибких и упругих элементов ПР. Под гибкостью захвата понимается его способность обеспечить плотный обхват поверхности объекта неправильной формы и способность захватывать объекты, неточно ориентированные относительно захвата. Преимущества гибких захватов особенно заметны при работе с деталями, расположенными в ячейках или на столе с некоторыми отклонениями от своих штатных мест, или при работе с грубо обработанными деталями (отливки или кузнечные заготовки).

Под упругостью понимается способность конструкции или некоторой структуры к упругой деформации под воздействием внешних сил или моментов. При снятии внешнего воздействия структура возвращается в положение равновесия. Надежность захватывания детали во многом определяется гибкостью захвата.

На рис. 8.4 схематически изображена захваченная балка неправильной формы, зафиксированная захватом в четырех точках. На нижней схеме балка деформирована и контакт с захватом обеспечивается лишь в трех точках. На схеме изображены действующие на деталь силы и моменты. При повороте захвата робота и балки значения приложенной силы  $F$  и момент  $M$  могут менять свой знак и абсолютную величину. В этих условиях при одном значении силы захвата фиксация балки в четырех точках более надежна, чем в трех. В конструкцию захвата может быть включен качающийся или поворачивающийся в небольших

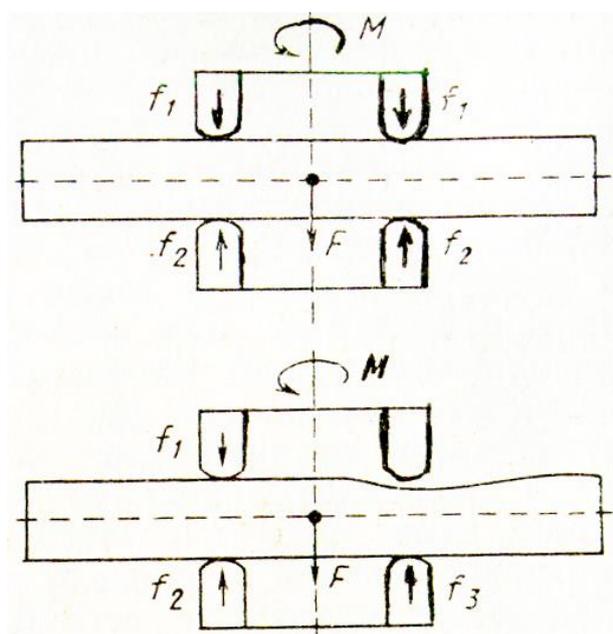


Рис. 8.4.

пределах верхний зажим, обеспечивающий захват балки неправильной формы в четырех точках. Это один из возможных путей увеличения гибкости захвата. На рис. 8.3 изображен захват, предназначенный для переноски необработанных поковок. При конструировании захвата принимались во внимание два фактора: высокая температура поковок ( $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и необходимость сохранения их ориентации. Шаровой шарнир, связывающий верхние пальцы, позволяет им независимо занимать нужное

положение относительно неровной или неправильной поверхности. Верхние и нижние пальцы приводятся в движение одним гидравлическим цилиндром, и вся конструкция, состоящая из гидравлического цилиндра и пальцев, может в небольших пределах качаться относительно рамы захвата. При сжатии пневматического цилиндра пальцы постоянно осуществляют захват поковки. Движение поршня продолжается до тех пор, пока деталь не будет крепко захвачена и пока не будет выбран свободный ход во всех соединениях. В этот момент срабатывает гидравлический тормоз, вся система захват-деталь становится жесткой, и этим обеспечивается сохранение ориентации детали.

Упругий захват позволяет адаптироваться к незначительным неровностям поверхности детали за счет собственной упругой деформации. Он также позволяет гасить перегрузки, возникающие при столкновении с

направляющими или оснасткой. Кроме того, упругий элемент может быть помещен между захватом и манипулятором робота. Запястья такой конструкции производятся промышленностью и называются устройствами пассивной податливости с удаленным центром (УПУЦ). Обычно в состав этой конструкции входят два металлических диска диаметром 50...150 мм, соединенные наклонными пружинами. Один из этих дисков крепится к манипулятору, а другой – к захвату, так что захват может отклоняться относительно манипулятора. Это способствует гашению слабых столкновений.

При выполнении сборочных операций они могут возникнуть, например, при вставке шпилек в отверстия. Подбирая жесткость и угол пружин, можно сместить центр податливости к торцу шпильки и, таким образом, избежать перекаса (или заклинивания) шпильки при входе в отверстие. При этом возникающие в момент контакта силы позволяют правильно сориентировать шпильку и произвести точную сборку.

Упругие захваты отличаются повышенной безопасностью. Упругая конструкция позволяет гасить контактные силовые взаимодействия. В отсутствие упругости ошибки в программировании, погрешности в действиях робота и в установке оснастки могут привести к аварии. В действительности, часто имеет смысл конструировать неупругие захваты, способные в момент столкновения отворачиваться или отдергиваться.

На рис. 8.5 показан захват с двумя пальцами со сменным набором наконечников. Его пальцы при движении навстречу друг другу не поворачиваются, так что захватывающие поверхности всегда параллельны. Эта конструкция в большей степени приспособлена для захвата плоских или прямоугольных предметов, чем захват с угловым движением пальцев (рис. 8.6).

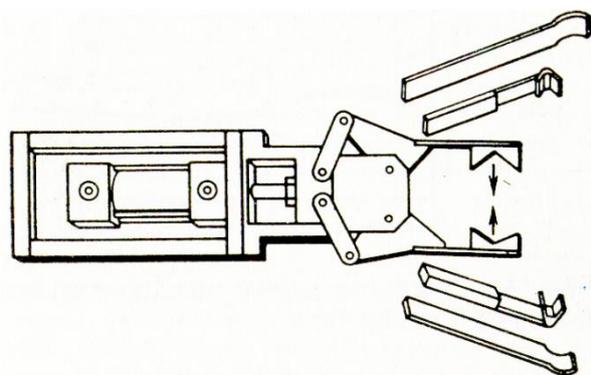


Рис. 8.5.

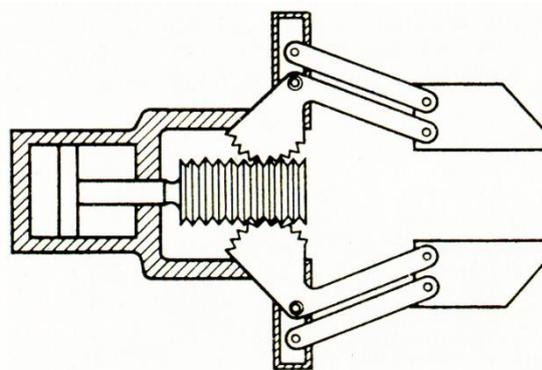


Рис. 8.6.

Механизм привода этого захвата состоит из двух секторных шестерней, приводимых в движение либо зубчатой рейкой, связанной с цилиндром, либо червяком на оси электродвигателя. При такой конструкции усилие захвата ограничено максимальными размерами секторных шестерней и предельной нагрузкой на их зубья. Существуют и другие способы организации параллельного движения захватывающих поверхностей, например, изготовив пальцы в виде ходовых гаек, одетых на винтовой вал с правосторонней резьбой с одной стороны и левосторонней с другой. Приводы с электрическим сервомотором и ходовым винтом очень удобны для малогабаритных захватов, широко применяющихся на операциях сборки электронных устройств.

Для тех же целей используются и миниатюрные пневмоцилиндры.

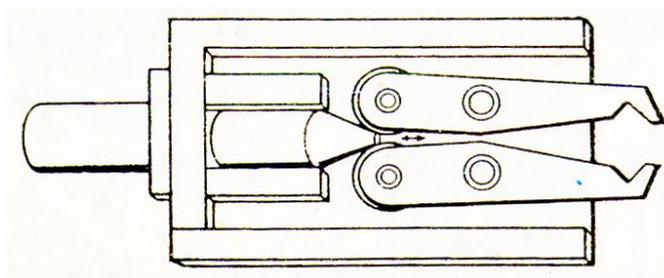


Рис. 8.7.

На рис. 8.7 представлен захват, который закрывается с помощью конусообразного кулачка. При выведении конуса из зазора пальцев они разводятся пружиной. Захват не может широко раскрываться, но позволяет

развить значительное усилие без применения мощных цилиндров или двигателей.

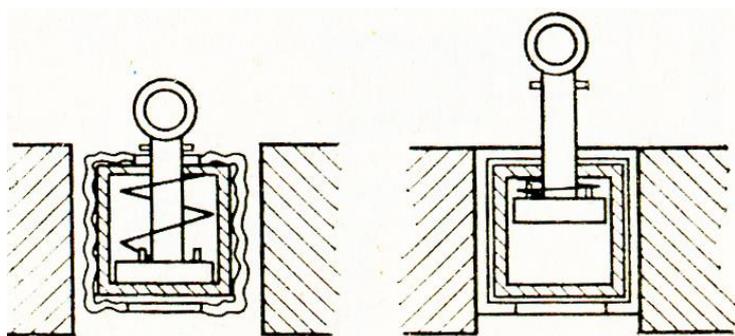


Рис. 8.8.

Для захвата труб, сосудов и других полых предметов часто используется внутренний захват. На рис. 8.8 изображена простая бесприводная конструкция саморасширяющегося внутреннего захвата. Захват состоит из гидравлического

цилиндра, окруженного резиновой мембраной, и поршня. Захват вводится внутрь полости детали, и при его поднятии внутренний поршень вытягивается и жидкость поступает в мембрану. Мембрана растягивается, заполняя внутреннюю полость детали. Когда робот опускает деталь, поршень в цилиндре опускается вниз, жидкость откачивается из мембраны и деталь освобождается. Поршень удерживается в нижнем состоянии с по-

мощью пружины. Захват можно модифицировать для внешнего обхвата-вания цилиндрических предметов.

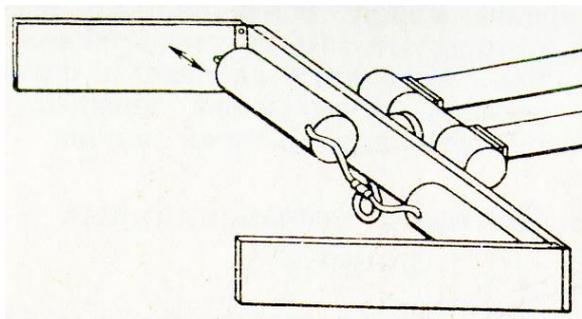


Рис. 8.9.

На рис. 8.9 изображен простейший захват для переноски легких крупных объектов (например, картонных коробок). Захват закрывается при угловом смещении пальцев (как в конструкции, изображенной на рис. 8.5).

На рис. 8.10 показан захват для работы с хрупкими предметами. Он может использоваться также при переноске свежих фруктов. Два подвижных пальца изготовлены из эластичных материалов. Когда давление воздуха внутри их падает, пальцы изгибаются внутрь и плавно прижимают предмет к расположенному между ними упору. Захват может удерживать предметы разных размеров и формы без проскальзывания, так как материал, из которого изготовлены пальцы, имеет высокий коэффициент трения.

Этот захват не очень мощный, но он податлив и корректирует мелкие погрешности позиционирования.

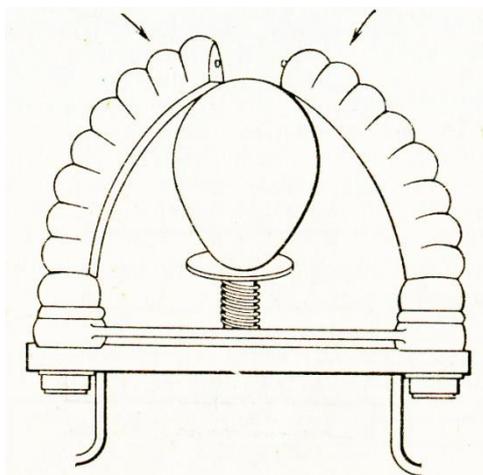


Рис. 8.10.

Большие плоские предметы обычно сложно захватить. Один из захватов, позволяющий это сделать, изображен на рис. 8.11. Для манипулирования листовым стеклом, металлом или большими легкими коробками используются вакуумные присоски. Поскольку вакуумные присоски обычно изготавливаются из эластичных материалов, этот захват, так же как изображенный на рис. 8.10, является податливым. На эффективность работы захвата сильно влияет погрешность ориентации объектов,

и поэтому он чаще всего используется для переноски деталей.

Если требуется точная ориентация детали относительно захвата, то захват может быть снабжен направляющими, ориентирующими углы или грани поднимаемых объектов.

На рис. 8.12 изображена модификация вакуумного захвата, построенного по принципу трубки Вентури. В таком виде он используется для

переноски хрупких кремниевых пластин. Для получения сильного разрежения (с помощью которого захватывается и фиксируется пластина) используются сжатый воздух и эжектор. Часто такое решение оказывается проще и дешевле, чем применение вакуумного насоса. В другой модификации этого захвата для подъема пластины используется аэродинамическая сила, образуемая потоком воздуха, направленного к центру пластины и далее равномерно стекающего к ее краям. Под захватом монтируются направляющие для центровки пластины при подъеме.

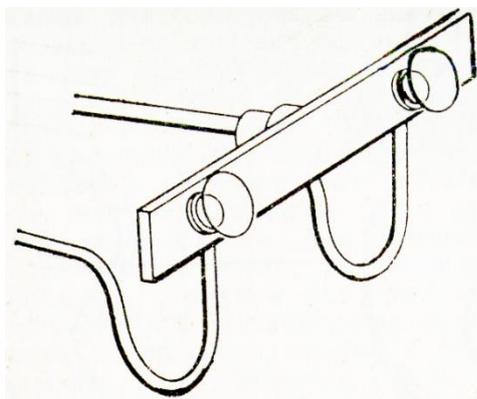


Рис. 8.11.

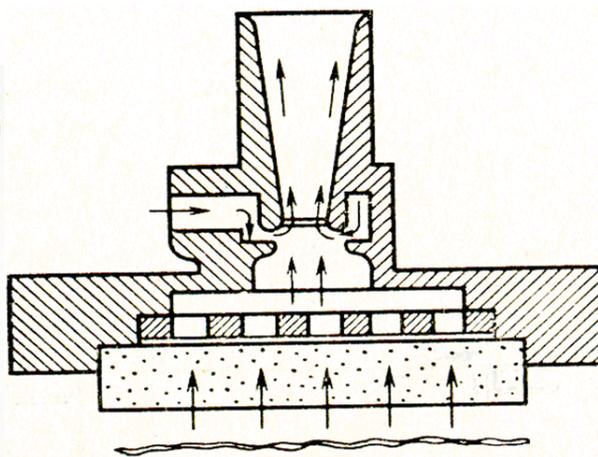


Рис. 8.12.

Для деталей, изготовленных из железа, можно использовать магнитные захваты. Они бывают самых различных размеров: от миниатюрных электромагнитов для переноски проволочных шпонок или гвоздей до гигантских электромагнитов-кранов на складах металлолома. Для того чтобы деталь была зафиксирована без проскальзывания, необходимо обеспечить хороший контакт между поверхностями магнита и детали. Для деталей с плоской поверхностью этого легко достигнуть, подвесив магнит податливой конструкции. Для неровных поверхностей используется прием, представленный на рис. 8.13.

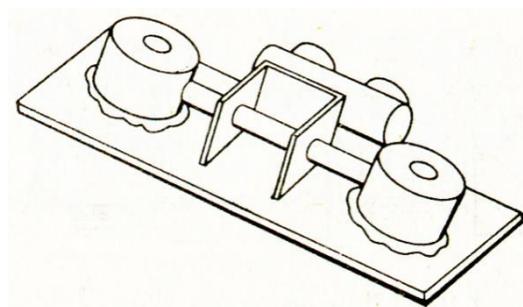


Рис. 8.13.

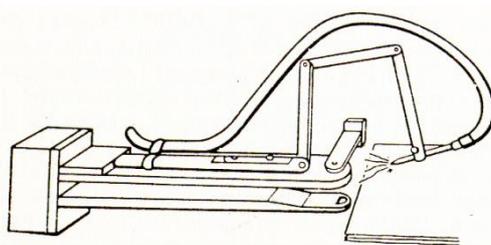


Рис. 8.14.

В этом случае к нижней стороне магнита крепится ящик или мембрана, заполненная металлическими опилками. Когда робот опускает электромагнит на деталь, частицы в ящике перераспределяются, повторяя рельеф поверхности, чем и обеспечивается хороший контакт. При подаче напряжения на электромагнит, частицы образуют твердую массу и обеспечивают жесткую фиксацию детали.

При работе с мягкими материалами (ткань, проволока, веревка) возникают специфические затруднения. Как правило, они<sup>1</sup> плохо фиксированы, из мотка или стопки трудно выделить одну нить или заготовку кроя. На рис. 8.14 изображен уникальный захват для последовательной подачи деталей кроя из стопки. Сначала на стопку направляется струя воздуха. В результате этого верхний кусок материала начинает колебаться и слегка приподнимается над стопкой. Под него подводится тонкая нижняя часть захвата. После этого захват закрывается. Для проверки толщины захваченного объекта (один или несколько слоев ткани) на нижней поверхности захвата установлен источник света, а на верхней фотодатчик.

Использование захватов с повышенной технологической гибкостью требует специальных приемов. Один из таких захватов изображен на рис. 8.1. Два из трех его пальцев приводятся в движение синхронно, одним двигателем. Кроме того, два пальца соединены через шарнир со вторым двигателем, что позволяет менять их ориентацию при захватывании. Для захвата длинномерных предметов два пальца могут быть развернуты параллельно друг другу и занять положение напротив третьего пальца. Для захвата небольших цилиндрических предметов два пальца разворачиваются так, чтобы закрытие всех пальцев осуществлялось по радиусам внутрь вплоть до соприкосновения в центре.

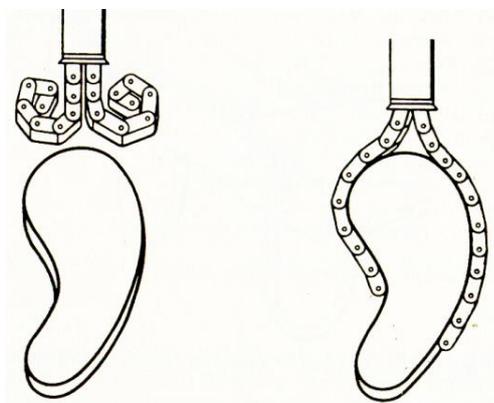


Рис. 8.15.

Еще один технологически гибкий захват представлен на рис. 8.15. Его пальцы легко обхватывают предмет, не оказывая на него большого давления. Он используется для захватывания хрупких предметов или предметов неправильной формы. Этот тип захвата был опробован при спасении людей в экстремальных ситуациях.

Захват составлен из множества последовательно соединенных звеньев и похож на часть велосипедной це-

пи. Между соединениями в звеньях имеются шкивы, к которым прикреплены тонкие тросики.

Если за них потянуть, то цепь звеньев меняет свою кривизну и обхватывает предмет. Давление при захвате равномерно распределяется по всей линии соприкосновения.

Ниже даны основные *классификационные признаки* ЗУ ПР.

***По способу удержания объекта манипулирования:***

*Зажимные ЗУ (устройства активного типа)* воздействуют на объект с помощью рабочих элементов (губок, пальцев, клещей и т. п.) и удерживают его в результате действия сил трения, возникающих при зажиме, или совместного действия сил трения и запирающих усилий. Зажимные ЗУ подразделяются на *механические* (клещи, тиски, шарнирные пальцы) и *с эластичными рабочими элементами* (камерами, деформирующимися под действием нагнетаемого внутрь сжатого воздуха или жидкости).

*Поддерживающие ЗУ* (крюки, петли, вилки и захваты, не зажимающие заготовку) используют для удержания объекта за его нижнюю поверхность, его выступающие части или имеющиеся в объекте отверстия.

*Притяжные ЗУ* оказывают на объект силовое воздействие, создаваемое, как правило, с помощью магнитного поля и вакуума, электростатического эффекта, адгезии, липких накладок и т. п.

***По характеру базирования объекта манипулирования:***

*ЗУ, способные перебазировать объект*, могут изменять положение удерживаемой детали благодаря управляемым действиям рабочих элементов.

*Центрирующие ЗУ* определяют положение оси или плоскости симметрии захватываемого объекта. Это прежде всего механические ЗУ, оснащенные кинематически связанными рабочими элементами, имеющие губки в виде призм и т.п.

*Базирующие ЗУ* определяют положение базовой поверхности (или базовых поверхностей), что характерно для поддерживающих ЗУ, а в ряде случаев и для зажимных ЗУ.

*Фиксирующие ЗУ* сохраняют положение объекта, которое тот имел в момент захватывания.

*ЗУ, не обеспечивающие базирования или фиксации объекта*, для оснащения ПР применяются крайне редко.

***По виду управления:***

*Неуправляемые ЗУ* с постоянными магнитами, с вакуумными присосками без принудительного разряжения и др.; для снятия объекта с таких ЗУ требуется усилие, превышающее усилие, необходимое для удержания объекта.

*Командные ЗУ* управляются только командами на захватывание или освобождение объекта; к таким ЗУ относятся устройства с пружинным приводом и стопорными механизмами, срабатывающими через такт, раскрытие или закрытие губок происходит при взаимодействии ЗУ с объектом манипулирования или элементами оборудования.

*Жестко программируемые ЗУ*, управляемые от УЧПУ; расположение рабочих элементов и усилие зажима в таких ЗУ меняются по заданной программе.

*Адаптивно управляемые ЗУ* – программируемые устройства, оснащенные различными датчиками внешней информации, определяющими форму поверхности и массу объекта, усилие зажима, проскальзывание объекта относительно рабочих элементов ЗУ и т. п.

*Цикловые.*

***По характеру крепления к руке ПР:***

*Несменяемые ЗУ*, являющиеся неотъемлемой частью конструкции ПР. Замена таких ЗУ не предусматривается.

*Сменные ЗУ* – самостоятельные узлы с базовыми поверхностями для крепления к ПР, не рассчитанные на быструю замену (например, ЗУ, установленные на фланце руки с помощью нескольких винтов).

*Быстросменные ЗУ* – сменные узлы, конструкция базовых поверхностей которых обеспечивает их быстрое крепление и освобождение (например, ЗУ с байонетным замком).

*ЗУ, с автоматической заменой*– устройства, конструкция базовых поверхностей которых обеспечивает возможность их автоматического крепления и освобождения.

***По числу рабочих позиций и последовательности их работы:***

*Однопозиционные.*

*Многопозиционные* (последовательного действия; параллельного действия; комбинированного действия).

***По степени универсальности:*** *многоцелевые* (универсальные); *целевые* (специализированные); *специальные*.

***По диапазону рабочих перемещений:*** *широкодиапазонные*; *узкодиапазонные*.

***По виду контакта:*** *одно-, двух- многосторонний*.

**Вместо заключения** – инновационная система автора для оптимизации производственных процессов в агропромышленном комплексе

Техническое творчество всегда ориентировано на предмет практической реализации намеченной цели с максимально возможной выгодой для существующих условий. В связи с этим средства механизации производства совершенствуются по принципу идеализации в соответствии с генеральной закономерностью:

- процесс совершенствования технических объектов представляет собой явление циклического изменения числа элементов конструкции по принципу: от простого к сложному изделию, затем от сложного к относительно простому изделию; процесс осуществляется через идеализацию объекта совершенствования, что предполагает: уменьшение числа элементов конструкции при сохранении или увеличении количества выполняемых ими функций; надежность и долговечность работы элементов устройства; эффективность воздействия рабочих органов машины на предмет труда;
- процесс совершенствования машин – это объединение определенного количества агрегатов в сложное изделие, последовательно упрощающееся по мере накопления научно-практической информации; этот процесс предполагает идеализацию изделия и обеспечение массовости потока предмета труда при осуществлении технологического процесса;
- процесс совершенствования системы средств механизации труда – это последовательность эволюции (от примитивных орудий труда к системе машин, а затем к системе технологий и машин), обеспечивающей образование бифуркационного множества технологических процессов (системы технологий), практически реализуемых в системе технологий и машин и предполагающих идеализацию технологий (создание идеальных конкретных технологических процессов), выполняемых идеальными техническими средствами.

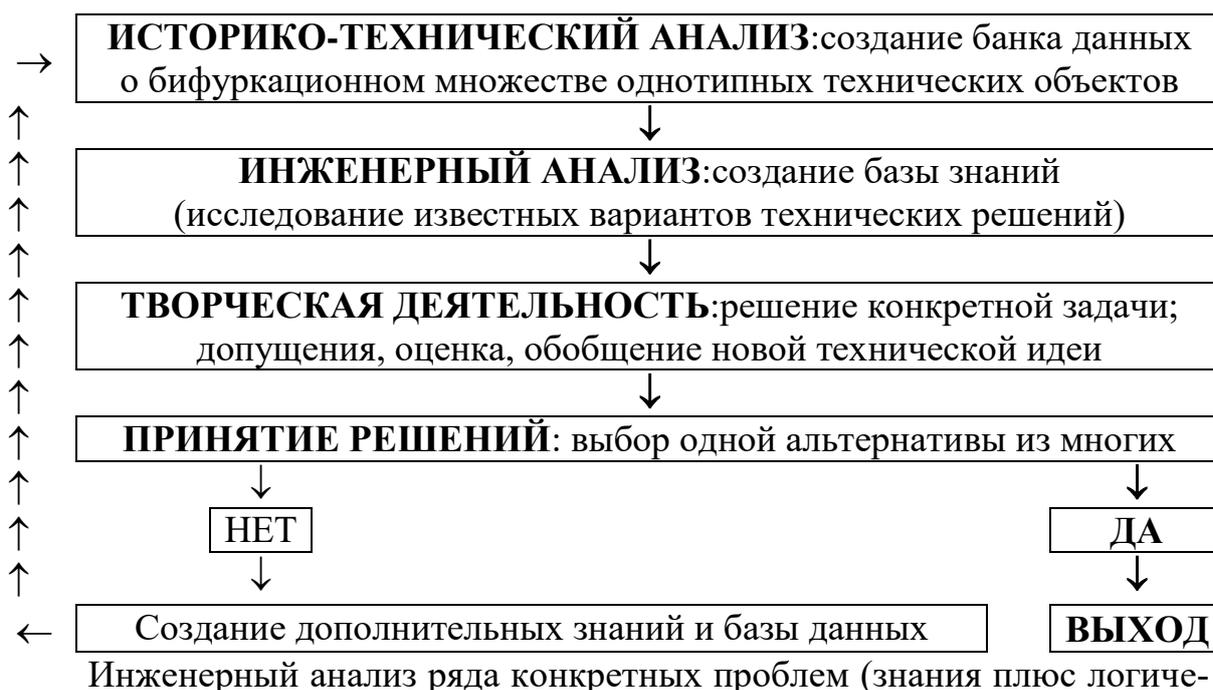
Практическое применение принципа идеализации технических объектов способствует изобретению упрощенных, но более эффективных (в сравнении с аналогами и прототипом) устройств и способов осуществления технологических процессов. Алгоритм получения новых технических идей по совершенствованию техники (таблица А) содержит перечисленные ниже основные этапы и представляет собой детальный перечень основных логических шагов решения поставленной задачи.

Историко-технический анализ процесса совершенствования техниче-

ских объектов конкретного типа (включая патентные исследования) обеспечивает создание банка данных (альтернатив) о бифуркационном множестве устройств конкретного назначения, что является базой для материализации новых технических идей. На этом этапе необходимо не только уяснить основные закономерности и периоды совершенствования объекта исследования, но и отметить следующее:

- была ли ранее кем-либо выбрана схема устройства, аналогичная предполагаемой?
- если была, то по каким причинам раньше не состоялась ее практическая реализация?
- получили ли развитие при совершенствовании аналога проблемы прочности, надежности машины, трудоемкости технического обслуживания и эксплуатации и в чем заключались принципы разрешения этих проблем?
- исследованы ли физико-механические характеристики предмета обработки или переработки; если исследованы, то в какой степени?
- исследовано ли воздействие подобных машин на окружающую среду и наоборот: какое воздействие оказывают специфические для данной местности природно-климатические особенности на конструкцию машин исследуемого типа и чем характерны конструктивные изменения, если такие имеются, в сравнении с другими условиями?

Таблица А



ский вывод) предполагает исследование одного из многих альтернативных вариантов известных или новых технических решений:

- формулирование проблем и их конкретизацию;
- разработка концепции модели, которая может упростить разрешение сформулированной проблемы;
- создание базы знаний: сбор как можно большего количества информации, прямо или косвенно имеющей отношение к сформулированной проблеме и построенной модели; классифицирование этой информации по основным и вспомогательным признакам, характеризующим проблему;
- работа с базой знаний: известный экспертам метод прямой цепочки рассуждений [ЕСЛИ...ТО] предполагает, что конкретно проявившаяся ситуация служит отправной точкой рассуждений; обратная цепочка рассуждений всегда начинается со следствия [ЕСЛИ...ПО ПРИЧИНЕ...ТО...в противном случае, если не получается ожидаемого результата... ПРОВЕРИТЬ ДРУГИЕ ВЕРСИИ – проследить еще одну цепочку];
- разработка базы знаний: построение дерева решений, ветви которого заканчиваются логическими выводами, что, в зависимости от особенностей мышления конкретного человека, может быть оформлено на бумаге или просто запечатлено в мозгу;
- преобразование дерева решений в закономерность, закон, правило, формулу, выводы и т.п., но с условием, что это будет единственный путь, ведущий к конечной цели, что определяет чрезвычайную важность этого этапа;
- обоснование и выбор конструктивной схемы технического решения на базе аналогов и прототипа; идеализация объекта изобретения: машины или ее элемента.

Творческая деятельность – это:

- работа с целью получить решение конкретной задачи;
- период умственного отдыха, связанного с отвлечением от решаемой задачи;
- озарение, как правило, приходящее после одного или нескольких циклов работы и отдыха: видоизменение известной или получение новой идеи, удовлетворяющей решение поставленной задачи;
- допущения, оценка, обобщение новой технической идеи.

Принятие решений – это выбор одной альтернативы из многих, выбор

наилучшего решения. Здесь важна способность уметь принимать решения.

В основу технологических машин производственного процесса положен характер отношений между транспортным и технологическим движениями, их влияние на производительность и конструктивные особенности. В машинах первого класса технологическая операция происходит только после завершения транспортной операции. Для этих машин (первый класс, дискретного действия) характерно прямое противоречие между транспортными и технологическими движениями. Технологическая обработка происходит только после завершения транспортного движения предмета обработки (подачи его в рабочую часть зоны машины) и наоборот – одно движение прерывается другим.

Технологический цикл  $T_{\Pi}$  обработки (переработки) предмета труда определяют по формуле (1):  $T_{\Pi} = L_{\text{ТР}} / v_{\text{ТР}} + L_{\text{ТЕХ}} / v_{\text{ТЕХ}}$ , где  $L_{\text{ТР}}, L_{\text{ТЕХ}}$  – величины транспортного и технологического перемещений;  $v_{\text{ТР}}, v_{\text{ТЕХ}}$  – транспортная и технологическая скорости. Операционный цикл орудия труда (инструмента) равен  $T_{\text{И}} = L_{\text{ТР}} / v_{\text{ТР}} + L_{\text{ТЕХ}} / v_{\text{ТЕХ}}$ , (2); рабочий цикл машины  $T_{\text{М}}$  равен  $T_{\text{М}} = L_{\text{ТР}} / v_{\text{ТР}} = L_{\text{ТЕХ}} / v_{\text{ТЕХ}}$ , (3); причем  $T_{\Pi} = T_{\text{И}} = T_{\text{М}}$ , (4). Производительность  $Q_{\text{М}}$  машин первого класса определяется длительностью всего технологического цикла обработки или переработки предмета труда, включающего транспортное и технологическое движения, функционально зависима от скоростей  $v_{\text{ТР}}, v_{\text{ТЕХ}}$  и соответствующих им ускорений  $a_{\text{ТР}}, a_{\text{ТЕХ}}$ :  $Q_{\text{М}} = f(v_{\text{ТР}}, v_{\text{ТЕХ}}, a_{\text{ТР}}, a_{\text{ТЕХ}}) = 1 / T_{\text{М}} = 1 / T_{\text{И}} = 1 / T_{\Pi}$ , (5). При совершенствовании машин дискретного действия повышение их производительности возможно лишь за счет длительности транспортной и технологической операций.

Для машин второго класса характерно совпадение транспортного и технологического движений. Транспортное движение становится непрерывным, а транспортная скорость равна технологической скорости. Технологический цикл  $T_{\Pi}$  обработки (переработки) предмета труда зависит от длины участка пути  $L_{\Pi}$  от места поступления предмета до его выхода из машины  $T_{\Pi} = L_{\Pi} / v_{\text{ТР}} = L_{\Pi} / v_{\text{ТЕХ}}$ , (6); операционный цикл орудия определяется параметрами инструмента  $L_{\text{И}}$ :  $T_{\text{И}} = L_{\text{И}} / v_{\text{ТР}} = L_{\text{И}} / v_{\text{ТЕХ}}$ , (7). Рабочий цикл машины  $T_{\text{М}}$ :  $T_{\text{М}} = L_{\text{И}} / v_{\text{ТР}} = L_{\text{ТИ}} / v_{\text{ТЕХ}}$ , (8). В данном случае  $T_{\text{М}} = T_{\text{И}} \neq T_{\Pi}$ , (9). Производительность  $Q_{\text{М}}$  машин второго класса определяется длительностью выпускного цикла, равного отношению транспортной скорости к шаговому расстоянию между предметами обработки в машине, функционально зависима от скоростей  $v_{\text{ТР}}, v_{\text{ТЕХ}}$ :  $Q_{\text{М}} = f(v_{\text{ТР}}) = f(v_{\text{ТЕХ}}) = 1 / T_{\text{М}} = 1 / T_{\text{И}}$ , (10).

Третий класс отличается независимостью между транспортным и

технологическим движениями. Технологический цикл обработки или переработки предмета труда равен  $T_{\Pi} = L_{\Pi} / v_{\text{ТР}}$ , (11). Операционный цикл инструмента –  $T_{\text{И}} = L_{\text{И}} / v_{\text{ТР}}$ , (12). Рабочий цикл машины определяется временем прохождения шагового расстояния  $h$  между двумя смежными рабочими органами или предметами труда –  $T_{\text{М}} = h / v_{\text{ТР}}$ , (13). В данном случае  $T_{\text{М}} \neq T_{\text{И}} \neq T_{\Pi}$ , (14). Возможность увеличения цикла инструмента не ограничена снижением производительности, которая, в свою очередь, ограничена лишь допустимыми значениями транспортной скорости, т.е. зависима от нее  $Q_{\text{М}} = f(v_{\text{ТР}}) = 1 / T_{\text{М}}$ , (15).

Четвертый класс характеризует еще и независимость других технологических параметров (понятие «обрабатывающий инструмент» заменяется понятием «обрабатывающая среда»). Технологический цикл, как и у третьего класса машин, равен  $T_{\Pi} = L_{\Pi} / v_{\text{ТР}}$ , (16). Операционный цикл инструмента определяется размерами предметов  $d$  в направлении их потока  $T_{\text{И}} = d / v_{\text{ТР}}$ , (17); также как и рабочий цикл машины  $T_{\text{М}} = d / v_{\text{ТР}}$ , (18). Тогда  $T_{\text{И}} = T_{\text{М}} \neq T_{\Pi}$ , (19). В машинах четвертого класса повышение производительности достигнуто не только за счет увеличения скорости, но и за счет увеличения числа предметов  $n$  переработки или обработки в поперечном сечении потока  $Q_{\text{М}} = f(v_{\text{ТР}}; n) = n / T_{\text{М}}$ , (20).

В роторных машинах нашел свое отражение принцип третьего класса, где технологические движения, хотя и не совпадают с транспортными, но являются их функциями во времени. Этот тип машин характерен относительно непродолжительными технологическими операциями. Анализ транспортно-технологических процессов с помощью упомянутой выше классификации не позволяет выполнить количественную оценку соотношения транспортных и технологических операций для выявления рациональной схемы транспортно-технологической машины.

Считаем целесообразным различать последовательные (ПС) и параллельные (ПР) транспортно-технологические процессы (ТТП; это машины первого и второго классов) – таблица Б. Для последовательного процесса характерна очередность выполнения операций: сначала транспортная, затем технологическая и т.д. Параллельные процессы характеризует совместимость обеих операций во времени. Длительность ТТП складывается из суммы времени, затраченного на осуществление транспортных ( $t_{\text{ТР}}^{\text{C}}$ ) и технологических ( $t_{\text{ТЕХ}}^{\text{C}}$ ) операций, и выражается известными формулами, соответственно,  $(t_{\text{ПС}}^{\text{C}}) = (t_{\text{ТР}}^{\text{C}}) + (t_{\text{ТЕХ}}^{\text{C}})$ , (21);  $(t_{\text{ПР}}^{\text{C}}) = (t_{\text{ТР}}^{\text{C}}) = (t_{\text{ТЕХ}}^{\text{C}})$ , (22).

Таблица Б



Взаимодействие рабочего органа машины и объекта переработки или обработки может быть индивидуальным, поточным или массовым. Индивидуальное взаимодействие характерно некоторым интервалом между технологическими операциями. Поточное взаимодействие происходит над объектами, следующими в рабочей зоне один за другим. Оно характерно тем, что начало операции над последующим объектом опережает окончание процесса переработки или обработки предыдущего. Массовая обработка осуществляется в какой-либо среде или воздействием какого-нибудь конкретного поля сразу на весь материал. Для оценки контакта взаимодействия (КВ) рабочего органа машины и перерабатываемого или обрабатываемого материала целесообразно ввести понятие о рангах этого взаимодействия: потенциальном ( $r_{\Pi}$ ) и фактическом ( $r_{\Phi}$ ). Потенциальным рангом назовем число, определяемое формулой (23):  $r_{\Pi} = l + 1$ , где  $l$  – показатель степени размерности типа контакта: точки (Т), линии (Л), поверхности (П), объема (О). Например, точка не имеет размерности, следовательно,  $r_{\Pi} = 1$ .

Фактический ранг отражает реальность взаимодействия рабочего органа (среды) и объекта производства. Используя понятие о рангах контактного взаимодействия, необходимо определить коэффициент соответствия потенциального и фактического контакта рабочего органа и упомянутого объекта производства  $K_S = r_\phi / r_\Pi$ , (24).

После этого следует приступить к оценке транспортно-технологического процесса в целом. Осуществляется расчет критерия совместимости во времени транспортных и технологических операций  $T_C = t_{\text{ТЕХ}}^C / t_{\text{ТР}}^C$ , (25). Если  $T_C \leq 1$ , процесс назовем согласованным (СП), в случае  $T_C > 1$  процесс будет противоречивым (ПП). Если процесс согласованный, следует выяснить, является ли он параллельным. (СП) = (ПП)? Если «да», то имеем рациональную конструкцию. Если «нет», то необходимо искать возможность компоновки рациональной технологической машины. Здесь тоже два варианта решений – положительный и отрицательный. В случае противоречивого процесса выявляем потенциальные возможности сокращения времени технологической операции за счет использования известных физических, химических, биологических и т.п. эффектов, известных средств механизации или разработки новых машин и механизмов  $T_\Pi = T_C / K_S \geq T_C$ ? (26).

Если есть возможность вместо линейного механического воздействия осуществить поверхностное или объемное, то появляется возможность разработки рациональной технологической машины. В противном случае процесс анализа целесообразно начинать с позиции пересмотра конструкции применяемой в технологическом процессе транспортной машины. После определения рациональной схемы технологической машины рассчитываем конечный критерий  $T_K = t_{\text{ТЕХ}}^C / t_{\text{ПС}}^C \gg 1$ ? (27).

Произведя расчеты и анализ в соответствии с блок-схемой алгоритма (таблица Б) можно сделать выводы о том, какой тип ТТП имеем дело, и есть ли возможность его усовершенствовать. Блок-схема алгоритма для анализа транспортно-технологических процессов с их количественно-качественной оценкой является «прозрачным ящиком», имеет один вход и несколько выходов, число которых растет в зависимости от несовершенства процесса. При правильной организации поиска рационального ТТП и технических объектов для его осуществления, один или несколько вариантов решения поставленной задачи могут быть рациональными.

Исследование патентных источников показало, что еще в 30-е годы в нашей стране предпринимались попытки создания техники на основе ис-

пользования принципа гусеничных машин. Основным элементом предложенной техники в то время являлась бесконечно-замкнутая цепь, на которой монтировали различные рабочие органы или ее саму применяли как рабочий орган. Для осуществления технологического процесса обработки материала использовали эффект неподвижности горизонтального участка цепи относительно объекта воздействия. Предложенные конструкции машин не нашли в те годы применения по причинам отсутствия мощной и скоростной техники, недостаточного уровня подготовки кадров, многих нерешенных технологических проблем, отсутствия крупных комплексов, способных эффективно эксплуатировать сложную, высокопроизводительную технику. Впоследствии это направление развития машин было забыто. Устройства были выполнены на уровне идеи.

В начале 70-х годов 20-го века вернулись к проблеме создания технологических машин. В основу был положен роторно-конвейерный принцип. В различных отраслях промышленности технологические роторные линии (именно линии, а не конструкции устройств, использующих в своей работе принцип вращения) нашли широкое применение.

Нами было предложено блочно-модульное устройство для обработки и переработки материалов, содержащее периферийные, промежуточные и один центральный вращающиеся модули, размещенные на общем основании и объединенные в блоки, которые по своей сути являются роторными технологическими линиями – свидетельство на полезн. модель 20219, МПКА 01 D 33/08; А 23 N 12/02; А01 F 29/00. Оpub. 27.10. 2001. Бюл. № 30.

Автором разработана экспертная система новшеств, сущность которой заключается в следующем. На любом этапе творческой работы нет ясности о том, сколько требуется информации для ответа на конкретный вопрос? В таких случаях удобно использовать принцип экспертной системы. Она предусматривает создание области запросов и базы знаний. Область запросов – основной предмет экспертной системы, например, о процессе совершенствования техники. База знаний – это массив информации, которую формирует автор новшества. Информация может быть постоянной и переменной. Постоянная информация – основа базы знаний. Информационное проектирование – это способ получения проекта нового механизма, машины или технической системы (от подготовки исходных данных до выработки конкретных рекомендаций) путем накопления, анализа и обобщения историко-технической и научно-практической инженерной информации. Экспертная система информационного проектирования новшеств

представлена:

- алгоритмами: инновационного анализа объекта совершенствования – взаимосвязи прикладных вопросов историко-технического исследования и основных вопросов производства; инновационного анализа транспортно-технологических процессов;
- критериями: функционально-энергетическо-структурного описания объектов (28); уровня совершенства техники (29); показателем уровня технологичности устройств (30) – см. далее.

Алгоритм анализа объекта совершенствования представляет собой детальный перечень главных логических шагов, требуемых для решения поставленной задачи. Это взаимосвязь парных факторов, где прикладные вопросы историко-технического исследования [(Когда произошло научно-техническое событие? Какое произошло научно-техническое событие?) + (Почему оно стало возможным? Какие выводы следуют из анализа этого события?)] переходят при осуществлении инновационного процесса в основные вопросы производства [(Что производить? Как изготовить?) + (Для кого предназначена продукция? Сколько требуется новых изделий?)]. Произведя расчеты и анализ в соответствии с алгоритмом анализа транспортно-технологических процессов (рисунок 1), можно сделать выводы о типе транспортно-технологического процесса и возможности его совершенствования.

Основной метод информационного проектирования новшеств предполагает экспертизу набора концепций и определяется комплексом критериев совершенствования средств механизации труда, которые формируются на основе объективных законов и закономерностей, характеризуют причины появления, существования и совершенствования объектов: критерии функционирования объекта; критерии условий его функционирования; критерий уровня совершенства объекта и критерий уровня его технологичности. Несоответствие функции и структуры объектов предъявляемым к ним требованиям разрешается взаимной трансформацией, причем, роль функции в этом процессе является доминирующей. Энергетическое взаимодействие элементов устройства обеспечивает выполнение его функционального назначения.

Функционально-энергетическо-структурное описание объектов и систем [FEST] удобно осуществлять в виде формулы (28):  $[FEST] = [(Ent \rightarrow Ex) : Eff (Lim 1, \dots, Lim N)] \rightarrow [A, B, \dots, N]$ , где Ent – исходное состояние продукта переработки или обработки; Ex – результат труда, вид гото-

вой продукции; Eff – эффект (механический, физический, химический или др.), примененный для преобразования сельскохозяйственного сырья в готовую продукцию или действие, направленное на осуществление конкретного сельскохозяйственного процесса или технологической операции; Lim 1, ..., LimN – особые условия, требования или ограничения; A, B, ..., N – известные или оригинальные элементы, узлы, агрегаты и т.п., обеспечившие достижение требуемого эффекта и особых условий, ограничений.

По своей сути FEST–характеристика является аналогом классификации, но более точной и конкретной для рассматриваемого типа устройств. Принципиальные различия основных критериев заключаются в следующем: как новшество и инновацию, с учетом экономических показателей, а также методов оценки и контроля надежности, более точно объект характеризует критерий уровня совершенства; а критерий уровня технологичности более полно характеризует объект как конструкцию. Требуется сравнение известного устройства и потенциального новшества по показателям технико-технологических критериев. Для оценки уровня совершенства техники применена единая абсолютная ограниченная шкала от 0 до 1 – шкала желательности.

Критерий уровня совершенства техники определяется формулой (29):  $T_C = T_1 * T_2 * T_3 * T_4 \leq 1$ , где  $T_1 = [a + b/(\beta + 1) + \dots + m/(\delta + 1)] / N$ , (29.1);  $T_2 = (1 - t_C^{TO}/t_K)$ , (29.2);  $T_3 = (1 - t_C^{PP}/t_K)$ , (29.3);  $T_4 = (1 - t_C^{PO}/t_K)$ , (29.4). Здесь N – общее количество элементов, из которых состоит технический объект; эти элементы классифицируются на группы, имеющие примерно одинаковые ресурсы, по a, b, ..., m единиц; в процессе проведения планово-профилактических мероприятий возможна замена изношенных элементов новыми деталями, суммарное их количество классифицируется по видам:  $\beta, \dots, \delta$ ; суммарное время проведения всех видов технического обслуживания равно  $t_C^{TO}$ ; суммарное время всех видов плановых ремонтов –  $t_C^{PP}$ ; суммарное время устранения отказов равно  $t_C^{PO}$ ;  $t_K$  – планируемый срок службы устройства. (Критерий может быть выражен с использованием показателей стоимости). Критерий уровня технологичности поясняется выражением (30):  $T_K = K_{БЛ} * K_{М.УН} * K_{У.ТП} * K_{ПР.ТП} \leq 1$ , где  $K_{БЛ}$  – коэффициент блочности;  $K_{М.УН}$  – коэффициент межпроектной унификации элементов конструкции;  $K_{У.ТП}$  – коэффициент унификации технологических процессов изготовления изделия;  $K_{ПР.ТП}$  – коэффициент прогрессивности технологических процессов изготовления изделия.

Для реальной конструкции, чем ближе к 1 показатели упомянутых

критериев, тем выше уровень ее совершенства в сравнении с аналогами. Критерии не отрицают, а дополняют известные из квалиметрии показатели эффективности конструкции машин. Поясним общее и различие методов теории надежности и критерия уровня совершенства.

Надежность изделия – это сумма нескольких показателей: технической надежности его в условиях производственных испытаний – сдача-приемка готовой машины ( $H_{\Pi}$ ); гарантии отсутствия вредного воздействия внешней среды ( $H_{В}$ ); надежности оператора системы «человек-машина» (ГОСТ 26387–84: свойство человека-оператора сохранять работоспособное состояние в течение требуемого интервала времени –  $H_{ч}$ ); надежности в конкретных условиях функционирования изделия ( $H_{К}$ ); гарантии общественной полезности изделия (отсутствие вредного воздействия на окружающую среду –  $H_{О}$ ).

Математическая модель надежности эффективного удовлетворения потребностей людей функционирующими или совершенствуемыми изделиями имеет вид:  $H = H_{\Pi} * H_{В} * H_{ч} * H_{К} * H_{О}$ , (31). Абсолютная надежность маловероятна, сумма надежности  $H$  и ненадежности  $N$  равна единице  $H + N = 1$ , (32). Задачу надежности можно решать, оценивая ненадежность формулой (33):  $N = 1 - H$  или  $N = a^M$ , где  $a$  – показатель ненадежности (0,1... 0,5) – характеризует уровень ненадежности;  $m$  – показатель надежности – характеризует уровень надежности, тогда имеем  $H = 1 - a^M$ , (34). Я. Дитрих сравнил два варианта. Ненадежность получения желаемого результата  $N_1 = 0,1$  и  $N_2 = 0,01$ . Тогда надежность эффективного удовлетворения потребностей людей конкретным изделием равна  $H_1 = 0,9 * 0,9 * 0,9 * 0,9 * 0,9 = 0,59049$ ;  $H_2 = 0,99 * 0,99 * 0,99 * 0,99 * 0,99 = 0,649539$ ;  $N_1 = 0,41$ ;  $N_2 = 0,35$ .  $\Delta N = (N_1 - N_2) / N_1 * 100\% = 14,63\%$ . Повышение надежности эффективного удовлетворения потребностей почти на 15% потребовало десятикратного повышения надежности изделия.

В результате функционирования изделия могут проявляться негативные факторы – «антипотребности». В этой связи введено понятие надежности проявления общественно полезных потребностей  $H_{О}$  в конкретных условиях функционирования изделия во взаимосвязи с надежностью эффективного удовлетворения проектной потребности  $H_3$  и ненадежностью проявления «антипотребности»  $N_A$  – формула (35):  $H_{О} = H_3 N_A$ , где  $N_A = 1 - H_A$ ;  $H_A$  – надежность проявления антипотребности.

Критерий уровня совершенства изделия не позволяет учесть проявление антипотребностей, вредного воздействия изделия на окружающую

среду и наоборот – воздействия на него среды. В этом заключается его недостатки. По мнению автора данной работы, потенциально вредное воздействие внешней среды на изделие ( $H_B$ ) и потенциально вредное влияние изделия на окружающую среду ( $H_O$ ) целесообразно исследовать параллельно инженерному анализу надежности техники методом экспертных оценок значимости факторов, а не субъективно, что объясняет отсутствие  $H_B$  и  $H_O$  в формуле (29).

Можно констатировать, что критерий совершенства техники (29) включает в себя показатели уровней ее совершенства и несовершенства. Их сумма, как и в случае суммирования надежности и ненадежности эффективного удовлетворения потребностей сообщества людей функционирующими или совершенствуемыми объектами, аналогично выражению (32), также равна единице.

Преимущество показателей критерия совершенства техники заключается в возможности количественно и качественно охарактеризовать структурные составляющие объекта. Что же касается вышеупомянутых показателей надежности ( $H_{П}$ ,  $H_{Ч}$ ,  $H_{К}$ ), то все они в предлагаемом критерии совершенства определяются через выражения, учитывающие разброс ресурсов отдельных элементов, потребность в планово–профилактических мероприятиях и ремонте, возможность внезапных отказов. Преимущества критерия уровня совершенства техники (29) заключаются и в том, что он объективно характеризует структурные показатели и надежность новшеств, в сравнении с их прототипами, реально отражая изменения, соответствующие генеральной закономерности совершенствования конструкций.

Главные различия основных критериев заключаются в следующем: как новшество, более точно объект характеризует критерий уровня совершенства; как конструкцию, объект характеризует комплексный показатель уровня технологичности; как инновацию, с учетом экономических показателей, более точно характеризуют объект методы оценки и контроля надежности. Нельзя не учитывать критерии качества изделий и вопросы защиты потребителя, определяемые общеизвестными экономическими методами. К современным методам относятся, например, алгоритм расчета технико–экономических показателей комплектов машин, который учитывает: суточные затраты труда ( $ч$ ) для основных и вспомогательных операций; годовые затраты труда, связанные с эксплуатацией технических средств и с выполнением ручных операций; годовые затраты труда на вы-

полнение ТО и ТР; оплату труда, капитальные вложения, амортизацию техники, затраты на электроэнергию и топливо, эксплуатационные расходы, приведенные и прочие затраты и т.п.

В конечном итоге сравнение базового и нового вариантов устройств практически сводится к сравнению оценок средств, приходящихся на их содержание. В дополнение к этой оценке требуется сравнение известного устройства и потенциального новшества по показателям технико-

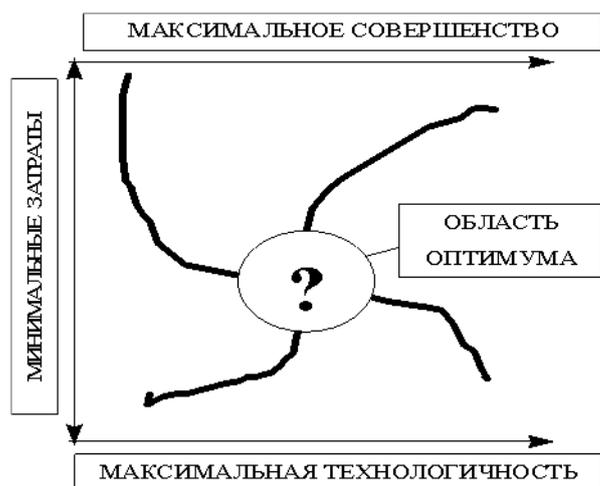


Рис. С. Инновационные показатели ТТП

технологических критериев: уровня совершенства (29) и уровня технологичности (30), с учетом их оптимизации в соотношении с экономическими показателями идеализации устройств (рис. С).

Лишь учет всех упомянутых критериев может дать полную количественно-качественную характеристику технического объекта за полный период его жизненного цикла. Развивая

теорию транспортно-технологических процессов, исходят из степени увеличения наработки машин. Пусть  $A = W_c \cdot t_a$ , (36) – работа, выполняемая устройством при последовательном выполнении технологических процессов; где  $W_c$  – суточная ее производительность,  $t_a$  – продолжительность использования устройства в пределах конкретного срока. При параллельном использовании это же устройство выполнит работу, равную  $A_1 = W_c \cdot t_{a1}$  (37). Тогда степень увеличения объемов работ равна  $\beta = A_1/A$ , (38) – при условии, если суточная производительность техники – величина постоянная. Дифференцированные затраты на осуществление работы считают по формуле 39:  $Z = \sum V_s O_s v_s / (DT_c W_{чс}) + B + K_{п} U C_{п} D$ , где  $M$  – число устройств, задействованных в технологическом процессе;  $V_s$  – балансовая стоимость  $s$ -го устройства;  $O_s$  – отчисления на восстановление  $s$ -го устройства в год (доля);  $v_s$  – удельный вес (доля) работ конкретного вида в общем объеме работ  $s$ -го устройства;  $T_c$  – продолжительность работ в течение суток;  $W_{чс}$  – часовая производительность устройства;  $B$  – условно-пропорциональные затраты на вспомогательные материалы, ремонт и техническое обслужива-

ние;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий брак и неустойки;  $У$  – удельный выход полезной продукции;  $C_n$  – цена ее реализации продукции.

Технико-экономическая целесообразность параллельного метода работы определяется как разность  $\mathcal{E} = Z_1 - Z_2$ , (40).

Таким образом, получены знания, моделирующие процесс совершенствования изделий; знания, имеющие прикладной характер для создания и экспертизы новшеств; знания, имеющие практическую ценность, которая состоит в значительном социально-экономическом эффекте, получаемом в условиях реализации новых знаний при создании нового поколения техники.

## Библиографический список

1. **Бройнль, Т.** Встраиваемые робототехнические системы. – М.-Ижевск: Ижевский ин-т компьютерных исследований, 2012. – 520 с.
2. **Воробьёв, Е.И.** Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е.И. Воробьёв, Ю.Г. Козырев, В.И. Царенко. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
3. **Владов, И.Л.** Сбалансированные манипуляторы / И.Л. Владов, В.Н. Данилевский, П.Б. Ионов и др.; Под ред. П.Н. Белянина – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
4. **Градецкий, В.Г.** Механика миниатюрных роботов /В.Г. Градецкий, М.М. Князьков, Л.Ф. Фомин, В.Г. Чащугин. – М.: Наука, 2010. 271 с.
5. **Зенкевич, С.Л.** Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
6. **Козырев, Ю.Г.** Промышленные роботы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 376 с.
7. **Конюх, В.Л.** Основы робототехники: учебное пособие / В.Л. Конюх. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 281 с.
8. **Марш, П.** Не счастье у работа профессий: Пер с англ./ П. Марш, И., Александер, П. Барнетт, Д. Дулинг, К. Гилл, П. Мэтьюз, Г. Моравек. Под ред. В.С. Гурфинкеля. – М.: Мир, 1987. – 182 с.
9. **Ноф, Ш.** Справочник по промышленной робототехнике. Кн. 1. / Ш. Ноф. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.
10. **Петров, Б.А.** Манипуляторы. Л.: Машиностроение. – 1984. – 238 с.
11. **Смирнов, А.Б.** Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. – 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2003.
12. **Титенок, А.В.** Классификация транспортно-технологических процессов //Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 1, 1994. С. 30, 31.
13. **Титенок, А.В.** Материализация технических объектов //Циклы природы и общества. Матер. 3-й Междунар. конф. Вып. 1,2. Ставрополь: СтУ, 1995. С. 257...263.
14. **Титенок, А.В.** Законы и закономерности цивилизованной антропогенной системы /Наука и образование возрождению сельского хозяйства России в XXI веке. Материалы международной научн.-практич. и учебно-методич. конференции. Брянск, 2000. С. 458...463.

15. **Титенок, А.В.** Экспертная система информационного проектирования новшеств // Управление изменением, № 1, 2001. С. 15...38.

16. **Титенок, А.В.** Проблема незавершенности цикла // Циклические процессы в природе и обществе. Матер. 2-й Междунар. конф. Вып. 2.– Ставрополь: Изд-во СтУ, 1994.– С. 122.

17. **Титенок, А.В.** Классификация транспортно-технологических процессов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 1, 1994.– С. 30, 31.

18. **Титенок, А.В.** Теория развития систем – основа качественной продукции // Проблема повышения качества машин. Тез. докл. Международной научно-технич. конф.– Брянск, 1994.– С. 172, 173.

19. **Титенок, А.В.** Гипотезы, законы и методы в творческой деятельности: монография.– Брянск: БГСХА, 1996.– 118 с., ил.

20. **Титенок, А.В.** Элементы теории совершенствования техники. Брянск: БГСХА, 1997.– 32 с., ил.

21. **Титенок, А.В.** МТС: ретроспективный анализ // Инженерное обеспечение агропромышленного комплекса. Тез. докл. Орел: ОГСХА, 1998.– С. 60...63.

22. **Титенок, А.В.** Принципы разрешения агроэкологических проблем / Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их разрешения. Ч.2. Материалы международной научной конференции.– Брянск: БГСХА, 1999.– С. 495...498.

23. **Титенок, А.В.** Совершенствование средств механизации сельскохозяйственного производства в России: монография.– Брянск: БГСХА, 1999.– 434 с., ил.

24. **Титенок, А.В.** Техническая эволюция // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях. Материалы научн.-практ. конф.– Брянск: БГТУ, 2000.– С. 90.

25. **Титенок, А.В.** Механизация сельского хозяйства России: теоретический аспект / А.В. Титенок.– Брянск: БГСХА, 2001.– 32 с., ил.

26. **Титенок, А.В.** Развитие механизации сельского хозяйства в России. Дисс. д.т.н. 07.00.10. – История науки и техники.– Москва: ИИЕиТ РАН, 2002.– 448 с., ил.

27. **Титенок, А.В.** История механизации посевных работ / Проблемы природообустройства и экологической безопасности. Материалы ХУІ межвузовской конференции.– Брянск: БГСХА, 2003.– С. 16...26.

28. **Титенок, А.В.** Исторические закономерности развития техники // А.В. Титенок, И.А. Титенок. Проблемы современного антропогенного сознания. Сб. статей. Вып. 3.– Брянск: БГУ, 2005.– С. 83...95.

29. **Титенок, А.В.** Закон материализации результата мыслительного процесса // Современные направления теоретических и прикладных разработок. Сб. научн. тр. Т. 9.– Одесса, 2007. С. 28...30.

30. **Титенок, А.В.** Анализ и экспертиза транспортно-технологических процессов / Технические, экономические и экологические проблемы транспорта: Материалы международной конференции.– Брянск, 2008. С. 67...79.

31. **Титенок, А.В.** Инновационная система для производственного процесса // Вестник БГТУ, № 4(20).– Брянск: БГТУ, 2008. – С. 90...98.

32. **Titenok, A.W.** GESETZEUNDGESETZMAESSIGKEITENDESZIVILISIERTENANTR OROGENENSYSYSTEMS / Вклад ученых в развитие Брянского региона. Материалы конференции.– Брянск: РГОТУПС, 2007. С. 155...165.

33. **Титенок, А.В.** Техническая эволюция // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях. Материалы научн.-практ. конф.16...18 ноября 2009 г. Брянск: БГТУ, 2000.- С. 90.

34. Полезная модель № 20219, МКИ<sup>3</sup> А 01 D 33/08; А 23 N 12/02; А01 F 29/00 Блочное–модульное устройство для обработки и переработки материалов / А.А. Артюшин, А.В. Титенок. И.А. Титенок. № 2001108066; Заявл. 27.03.2001; опубл. 27.10.2001. Бюлл. № 30.

35. **Челпанов, И.Б.** Устройство промышленных роботов. Л.: Машиностроение, 1990. 223 с.

36. **Юревич, Е.И.** Основы робототехники: учебное пособие. – 2-е изд. / Е.И. Юревич.– СПб.: БХВ-Петербург, 2007.– 417 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Интегральный закон изменений в синергетических системах.	4
Основные понятия.....	8
Термины и определения.....	8
1. Общие сведения о робототехнике и роботах.....	10
1.1. Ретроспектива промышленных роботов .....	10
1.2. Этапы роботизации и поколения роботов .....	12
1.3. Классификация промышленных роботов.....	21
1.4. Перспектива робототехники.....	25
1.5. Аналогии промышленных роботов .....	26
1.5.1. Автооператоры.....	26
1.5.2. Манипуляционные роботы с ручным управлением.....	28
1.5.3. Сбалансированные манипуляторы .....	30
1.5.4. Краны с жестким подвесом груза .....	31
1.5.5. Специальные манипуляторы.....	32
1.6. Номенклатура основных показателей ПР.....	32
1.7. Соотношения между основными показателями ПР.....	38
1.8. Параметры, определяющие технический уровень роботов...	42
1.9. Системы координат промышленных роботов.....	43
2. Структурные и кинематические схемы манипуляторов ПР...	46
2.1. Степени подвижности и кинематические пары.....	46
2.2. Критерии сравнения кинематических схем.....	48
2.3. Схемы манипуляторов с двумя степенями подвижности ....	52
2.4. Схемы манипуляторов с тремя степенями подвижности ....	56
2.5. Схемы ориентирующих устройств .....	63
2.6. Дополнительные степени подвижности.....	66
2.7. Модульные промышленные роботы.....	71
2.7.1. Принципы модульного построения оборудования .....	71
2.7.2. Виды модулей ПР, способы построения модификаций ...	74
2.7.3. Примеры модульных ПР.....	81
3. Управление движениями (УД): от человека – к роботу....	85
3.1. Рука человека и работа.....	85
3.2. Общая схема УД человека.....	88
3.2.1. Динамические уровни УД.....	88
3.2.2. Tактический уровень УД.....	91
3.2.3. Стратегический уровень УД.....	91
3.3. Общая схема УД робота.....	92
3.3.1. Исполнительная система ПР.....	92
3.3.2. Управление и программирование ПР	93
3.3.3. Управление с позиционной обратной связью и программирование методом обучения по I-му циклу.....	93

3.3.4.Цикловое управление.....	96
3.3.5.Управление от ЭВМ и интеллектуальные роботы.....	97
3.3.5.1.УД руки на основе сенсорной информации .....	97
3.3.5.2 Техническое зрение.....	97
3.3.5.3 Новые методы программирования.....	97
3.3.6. Направление развития робототехники.....	98
3.3.7..Многозвенные манипуляторы, управляемые от ЭВМ.....	99
3.3.8..Использование тактильной информации.....	102
3.3.8.1 Управление с тактильной обратной связью.....	103
3.3.8.2 Управление с силовой обратной связью.....	103
3.3.8.3 Анализ силовой информации.....	104
3.4.Зрение промышленных роботов.....	105
3.4.1.Условия эффективности применения систем технического зрения.....	106
3.4.1.1 Обеспечение хорошей видимости объектов распознавания..	106
3.4.1.2 Обработка изображений в реальном времени.....	107
3.4.1.3 Обеспечение достоверности.....	107
3.4.1.4 Адаптация к изменению класса распознаваемых объектов	108
3.4.2.Структура системы технического зрения.....	108
3.5..Языки программирования промышленных роботов.....	110
4. Механизмы и элементы конструкций ПР.....	112
4.1. Механизмы ПР.....	112
4.2. Приводные механизмы ПР.....	113
4.2.1. Пневматический привод ПР.....	113
4.2.2. Гидравлический привод ПР.....	122
4.2.3. Электрический привод ПР.....	128
4.2.4. Комбинированные приводы ПР.....	137
4.2.5. Микропривод ПР.....	139
4.2.6. Техническая мышца – разновидность привода ПР.....	141
4.2.6.1 Мышцы человека.....	141
4.2.6.2 Мышцы робота.....	143
4.2.7. Рекуперация энергии в приводах ПР.....	146
4.3. Механизмы передач ПР.....	148
5. Несущие конструкции ПР.....	155
6. Рабочие органы ПР.....	159
6.1. Технологические РО.....	159
6.2. РО для сборки и разборки изделий.....	160
6.3. Сварочные РО.....	161
6.4. РО для очистки поверхностей деталей воздухом.....	164
6.5. РО для поверхностной обработки изделий.....	164

6.6.	РО для нанесения покрытий на поверхности изделий.....	164
6.7.	Рабочие органы-дозаторы.....	166
6.8.	Контрольно-измерительные РО.....	166
7.	Процесс манипулирования объектами.....	167
7.1.	Классификация объектов манипулирования.....	167
7.2.	Требования к изделию и оборудованию РТК.....	170
7.3.	Концепция схвата – от человека к роботу.....	173
7.3.1.	Предмет берет человек.....	173
7.3.2.	Предмет берет робот.....	178
8.	Захватывающие устройства промышленных роботов.....	185
	<i><u>Вместо заключения</u> – инновационная система автора</i>	196
	<i>для оптимизации производственных процессов</i>	
	<i>в агропромышленном комплексе</i>	
	Библиографический список.....	210

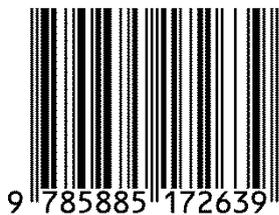
Александр Владимирович Титенок

**РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
И БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

Редактор Павлютина И.П.

Компьютерный набор А.В. Титенок

ISBN 978-5-88517-263-9



---

Подписано в печать 18.03.2016. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 12,55. Изд. № 4982. Тираж 550 экз.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365, с. Кокино, Выгоничского р-на, Брянской обл., БГАУ