

# ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Под редакцией канд. техн. наук  
Л. С. Ямпольского

---

Киев «Техніка»  
1984

Промышленная робототехника/Л. С. Ямпольский, В. А. Яхимович, Е. Г. Вайсман и др.; Под ред. Л. С. Ямпольского.— К.: Техніка, 1984.— 264 с., ил.— Библиогр.: с. 258—261  
В пер.: 1 р. 60 к. 10000 экз.

В книге изложены основные направления работ в области робототехники, описаны методы и средства роботизации технологических процессов. Приведены формализованное описание элементов роботизированного производства, морфологическое описание робототехнических систем и средств организации рабочей среды, с которой взаимодействуют промышленные роботы в процессе выполнения производственных функций. Рассмотрены примеры агрегатированного построения промышленных роботов. Изложены принципы построения систем управления и информационного обеспечения промышленных роботов и робототехнологических комплексов. Рассчитана на инженерно-технических работников различных отраслей промышленности.

П 2203000000-150 17.84  
М202(04)-84

32.816

Авторы: Л. С. Ямпольский, В. А. Яхимович, Е. Г. Вайсман, Б. А. Дремчук, Л. В. Козаченко

Рецензенты: канд. техн. наук В. М. Шаповал, Ю. Ф. Галаган  
Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи  
Зав. редакцией З. В. Божко

В постановлениях партии и правительства последних лет неоднократно отмечалось, что для повышения эффективности производства необходимо резко сократить использование ручного труда за счет широкого внедрения робототехники.

Промышленная робототехника — это направление развития науки и техники в области механизации и автоматизации производственных процессов на основе использования принципиально новых многофункциональных технических средств с гибкими технологическими свойствами — промышленных роботов, вызванное к жизни потребностями промышленного производства. В промышленной робототехнике выделяют четыре взаимосвязанные проблемы:

разработка методов формализованного описания производственных процессов и морфологического описания объектов роботизации, основанных на принципах системного подхода к анализу роботизируемого производства как объекта управления;

создание собственно промышленных роботов и элементной базы робототехнических систем;

разработка роботизированных технологий, связанных с реорганизацией промышленности;

создание робототехнологических комплексов и построение автоматизированных систем управления роботизированным производством.

Эти проблемы решаются по следующим направлениям:

общенаучному, задачами которого являются создание методологии формализованного и морфологического описания объектов роботизации, определение условий оптимального взаимодействия и принципов построения технических систем «промышленный робот—объект роботизации—среда», определение условий наложения достаточных и избыточных связей на манипулируемый объект, типизация процессов и группирование объектов по характерным для промышленной робототехники признакам подобия с целью уменьшения непроизводительных затрат на переналадку, переконфигурацию робототехнических систем, разработку технологической оснастки и т. д.;

технологическому, связанному с разработкой принципов технологической подготовки роботизированного производства и обоснованием критериев технико-экономической оценки объектов роботизации, включая создание экспрессных методов определения уровня технологичности процессов и объектов автоматизации с учетом внедрения промышленных роботов (ПР) в производство;

проектно-конструкторскому, обеспечивающему разработку методов кинематического и динамического анализа и синтеза манипуляционных систем ПР и других элементов робототехнических систем, в частности, средств подготовки среды, транспортных механизмов, технологической оснастки, средств относительного ориентирования и накопления объектов. Это направление предусматривает совершенствование элементной базы ПР и разработку систем автоматизированного проектирования робототехнических систем и их элементов;

математического и программного обеспечения задач управления и функционирования робототехнических систем, в том числе группового управления технологическим оборудованием и ПР от ЭВМ, а также разработки принципов иерархического управления роботизированным производством;

информационного обеспечения робототехнических систем на основе разработки сенсорных устройств внутренней и внешней информации, в том числе систем зрительного восприятия окружающей среды и ее моделирование.

В последние годы делается попытка разработать научные основы промышленной робототехники [26, 34, 56, 65, 76]: создание аппарата формализованного описания роботизируемых производственных процессов, морфологическое описание

свойств и структуры объектов роботизации и компоновок робототехнических систем, проведение технологической подготовки роботизированного производства, анализ технологичности объектов роботизации, а также создание инженерной методики планирования движений рабочих органов манипуляционных систем ПР.

Разработка таких основ тем более важна, что СССР находится в числе передовых стран по производству и использованию промышленных роботов. С началом 11-й пятилетки отечественная робототехника вступила в третий, качественно новый период развития — период широкого внедрения ПР в народное хозяйство, который должен уже приносить ощутимые результаты в масштабах всей страны с тем, чтобы к 2000 г. заменить большинство рабочих, занятых физическим трудом, промышленными роботами во всех основных производственных процессах.

В данной книге авторы стремились обобщить отечественный и зарубежный опыт роботостроения, систематизировать материал по элементной базе ПР и создаваемым на их основе робототехническим системам. Вопросы анализа производства и проектирования, изготовления и внедрения ПР изложены с учетом терминологии и определений, принятых в робототехнике, и рассмотрены таким образом, чтобы отразить универсальность подхода к решению задач роботизации технологических процессов в машино-, приборостроении и в других отраслях промышленности.

Работа по созданию книги распределена между авторами следующим образом: предисловие, гл. I, II. 1 — II.3 и II.5, IV, V, VI.1—VI.3, VII.1—VII.5, IX написаны Л. С. Ямпольским; гл. II.4, III, VII.6, VIII — В. А. Яхимовичем; гл. XI — Е. Г. Вайсманом; гл. VI.4 — совместно Л. С. Ямпольским и В. А. Яхимовичем; гл. X — совместно Л. С. Ямпольским, Б. А. Дремчуком и Л. В. Козаченко; приложение — Л. С. Ямпольским.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам канд. техн. наук В. М. Шаповалу и Ю. Ф. Галагану за ценные замечания, способствовавшие улучшению содержания книги.

Отзывы и пожелания  
просим направлять по адресу:  
252601, Киев, 1,  
Крещатик, 5,  
издательство  
«Техніка»

## Глава I

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

#### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Промышленный робот** — перепрограммируемая автоматическая машина, применяемая в производственном процессе для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям человека, при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки. Отличительным признаком ПР является наличие манипулятора или манипуляторов.

В соответствии с ГОСТ 25685—83, ГОСТ 25686—83 манипулятор может быть только составной частью автоматической машины — промышленного робота в виде всего исполнительного устройства или его части. В сочетании с автоматическим устройством управления манипулятор становится промышленным роботом.

Часто используемое вместо термина «промышленный робот» наименование «автоматический манипулятор» может рассматриваться как синоним только для роботов с одним манипулятором. Термин «автоматический манипулятор с программным управлением» имеет еще более узкий смысл, так как применим только к жестко программируемым ПР, т. е. к роботам первого поколения без очувствления и адаптации.

Выполнение ПР двигательных функций сопровождается его управляющими и контролирующими функциями (например, ПР с адаптивным управлением). Поэтому в общем случае ПР состоит из трех систем: манипуляционной — для целенаправленного воздействия на окружающую среду; информационной — для определения состояния манипуляционной системы робота и оценки результатов воздействия на окружающую среду; управляющей — для выработки алгоритма оптимального взаимодействия манипуляционной системы робота с окружающей средой.

**Технический комплекс** — совокупность средств технического обеспечения.

**Технологический комплекс** — технический комплекс с отношениями связей между элементами, обусловленными конкретным способом оперирования материей.

**Робототехнологический комплекс (РТК)** — технологический комплекс, в котором отдельные виды отношений преобразований и отношений связей осуществляются промышленным роботом (роботами). Таким образом, РТК представляет собой совокупность средств технического обеспечения, включающую систему транспортных, загрузочных и ориентирующих устройств, накопителей исходного материала и готовой продукции, технологическую оснастку и инструмент, промышленный робот или несколько роботов в комплексе с несколькими единицами технологического оборудования, а также контрольно-измерительные и управляющие средства, предназначенные для выполнения

нескольких технологических операций или переходов, объединенных единым технологическим процессом.

**Робототехнологические единицы (РТЕ)** — совокупности средств технического обеспечения (включающие транспортные подводящие и отводящие устройства, накопители исходного материала и готовой продукции, промышленный робот в комплексе с одной единицей технологического оборудования, а также контрольно-измерительные и управляющие средства), организованные для выполнения элементарных технологических операций или переходов.

**Техническая система** определяется совокупностью преобразований энергии, массы и информации и взаимосвязей между ними, которые характеризуют входы и выходы технических средств (технических комплексов).

**Робототехническая система (РТС)** — это техническая система, в которой преобразования и связи энергии, массы и информации отражены с использованием промышленных роботов.

Робототехническая система и робототехнологический комплекс отражают разные стадии «завершенности» одного и того же явления. В иерархическом уровне производственной системы по отношению к верхнему уровню РТК выступает как составная часть РТС (подсистема). В то же время РТК объединяет в своем составе несколько РТЕ.

Для тех случаев, когда РТЕ или РТК рассматриваются как самостоятельные звенья, правомерно утверждение, что всякий комплекс есть система, и системный анализ применим к комплексам.

Робототехнические системы обладают всеми основными признаками системности, а именно: целостностью системы машин, проявляющейся в том, что она обладает свойствами, отличными от свойств составляющих ее элементов; иерархичностью структуры, проявляющейся в наличии нескольких уровней иерархии и возможностью описания РТС с разной степенью детализации, определяемой рассматриваемым уровнем в зависимости от решаемых задач. Так, отдельные составляющие РТС, выполняющие самостоятельные функции, можно рассматривать при дифференцировании в качестве самостоятельных сложных систем (например, роботизированная линия, РТК, РТЕ и т. д.): И, наоборот, в процессе интегрирования можно прийти от системы низшего уровня к более высокому.

В процессе создания РТС как системы целесообразно исследовать ее взаимодействие с внешней средой, а также структуру и взаимосвязи элементов этого процесса. Элементы входа соответствуют предыстории процесса создания РТС и содержат сведения о современном уровне технических знаний, об экономических, социальных и экологических условиях, уровне развития производства, представляющие собой две составляющие — социально-экономический заказ общества и современный потенциал научно-технических знаний. Создание РТС мотивируется социально-экономическим заказом общества, реализовать который позволяет современный уровень научно-технических знаний [71]. В процессе синтеза этих составляющих возникают предпосылки создания новой модели РТС и формируется технико-экономическое задание на ее разработку (рис. 1.1). Оценка возможности технической реа-

лизации и экономической целесообразности такого задания позволяет принять объективное решение о необходимости финансирования НИОКР, являющееся входом процесса разработки новой РТС.

К основным показателям качества РТС относятся:

социально-экономические, отражающие необходимые затраты общественного труда на создание, производство и эксплуатацию системы, а также конечные результаты ее использования в общественном производстве;

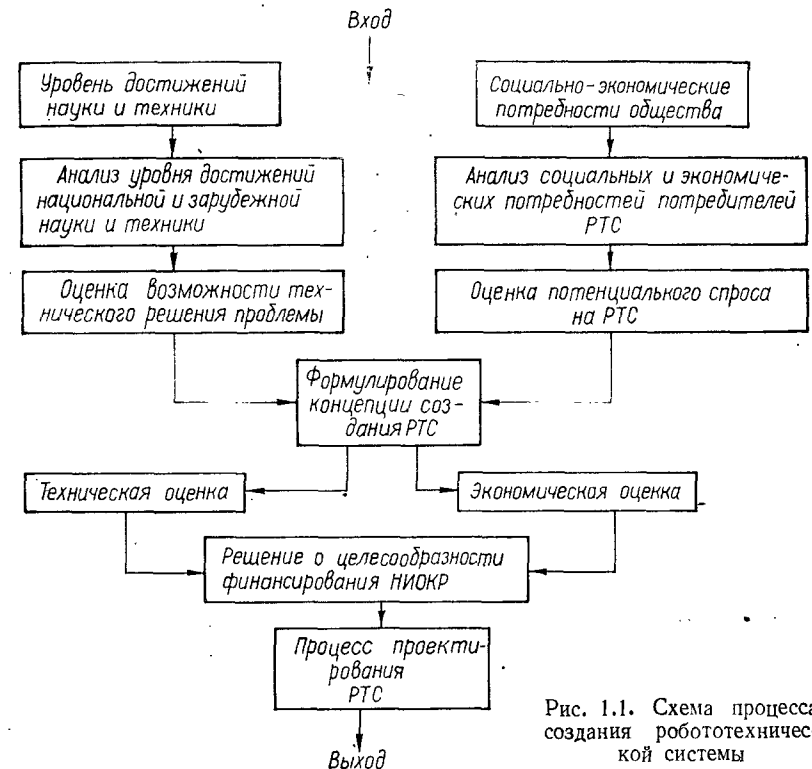


Рис. 1.1. Схема процесса создания робототехнической системы

технологические, характеризующие надежность ее функционирования в процессе труда (мощность, производительность, точность, безотказность, долговечность, универсальность и др.);

эргономические, характеризующие РТС во взаимосвязи «человек — техника» и учитывающие ее приспособляемость к антропометрическим, биомеханическим, физиологическим и психологическим свойствам человека, которые проявляются в процессе труда;

эстетические, характеризующие композиционную форму системы (целостность, гармоничность и др.).

Показатель, определяющий эстетические потребительские свойства РТС, трудно поддается численному выражению, поэтому выбор и оценка такого рода показателей проводится специалистами-экспертами по определенной шкале баллов.

Для оценки качества РТС могут использоваться следующие методы:

экспериментальный — измерение показателя посредством статистической обработки материалов наблюдений и испытаний;

расчетный — проведение вычислений с помощью математических моделей, отражающих закономерности изменения показателя во времени;

экспертный — учет мнения группы специалистов, компетентных в данной области разработок.

Оценить уровень качества РТС можно с помощью дифференцированного подхода или обобщенного показателя при комплексном подходе. При дифференцированном подходе сопоставляются единичные показатели:  $q_i = x_i^1/x_i^0$ , где  $x_i^1$  — значение  $i$ -го показателя качества проектируемой РТС;  $x_i^0$  — значение  $i$ -го показателя качества базового варианта РТС.

Обобщенный интегральный показатель качества РТС, используемый при комплексном подходе, определяется как средневзвешенный арифметический показатель  $Q = \sum_{i=1}^n b_i q_i$

или средневзвешенный геометрический показатель  $Q = \prod_{i=1}^n q_i^{b_i}$ , где  $\Pi$  — знак произведения множителей;  $q_i$  — относительный частный показатель;  $b_i$  — коэффициент весомости.

При расчете обобщенного показателя качества РТС необходимо выполнение следующих условий:

числовые значения каждого относительного частного показателя должны быть положительны, но не больше единицы, т. е.  $0 < q_i \leq 1$ ;

числовое значение каждого относительного частного показателя должно рассчитываться способом, при котором их увеличение или уменьшение означало бы соответственно повышение или снижение уровня качества:

$$q_i = x_i^1/x_i^0 \text{ или } q_i = x_i^0/x_i^1;$$

числовое значение обобщенного показателя качества РТС должно быть положительным, но не больше единицы, т. е.  $0 < Q \leq 1$ .

Показатель качества РТС должен оцениваться с учетом целевой функции РТС и во взаимосвязи технико-экономических параметров комплекствующих ее технических средств. Не все показатели могут быть использованы в управлении качеством РТС ввиду специфики расчета этих показателей для РТС. Следует также учитывать, что оценка качества РТС должна отвечать требованиям комплексного подхода.

## 2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РОБОТИЗИРУЕМОГО ПРОИЗВОДСТВА

Разнообразие технологических процессов требует такого подхода к созданию РТС, при котором можно было бы формировать общие типовые решения по разработке роботизированных технологий. Таким подходом является системный анализ роботизируемого производства,

который базируется на принципах классификации информации [72] и предусматривает рассмотрение РТК и его элементов в связи с другими объектами управления и оптимальное построение комплекса с целью повышения его эффективности. При этом РТК выступает как регулярная или упорядоченная система, состоящая из взаимосвязанных частей, предназначенных для достижения одной цели.

Сущность системного анализа состоит в установлении всех взаимосвязей между переменными факторами и определении их влияния на поведение всего комплекса элементов РТК как единого целого, причем соблюдается принцип иерархии критериев, задач и структуры.

Информационный подход базируется на следующих положениях:

определение объекта управления «рекурсивно», т. е. он рассматривается как элементарный объект (ЭО) некоторого объекта управления более высокого порядка, а сам, в свою очередь, может быть расчленен на ЭО более низкого порядка;

для сопоставления объектов управления все их множество разбивается на непересекающиеся подмножества ЭО таким образом, чтобы информация о каждом из них однозначно выражалась через определенный состав признаков и не дублировалась при решении смежных задач управления;

объекты управления разделяются на шесть видов — выполняющие НИР и ОКР предприятия, сами НИР и ОКР, производственные предприятия, источники научно-технической информации, процессы, изделия;

все признаки информации, описывающие ЭО, делятся на адресную и технико-экономическую части. Адресная часть содержит все виды признаков, определяющих координаты в пространстве и времени и стороны использования ЭО, технико-экономическая часть содержит виды признаков, определяющих комплекс технико-экономических параметров (ТЭП) в зависимости от вида ЭО. Перечень ТЭП является единым для всех ЭО, а содержание классификатора по этим признакам специфично для каждого из ЭО.

Рассмотрим в качестве объекта управления модель сборочного процесса, для которой входом являются комплекующие сборочную единицу элементы с определенной геометрией сопрягаемых поверхностей и физико-механическими характеристиками материала элементов, процессом — переналаживаемая сборочная РТС, выходом — сборочное соединение с характеристиками сопряжения (рис. 1.2).

С понятием «объект управления» связано понятие «окружающая среда», т. е. объект или несколько объектов, которые определенным образом влияют на исследуемый объект управления, либо последний находится под непосредственным их воздействием. Поэтому любой объект управления характеризуется связями с окружающей средой.

Для сопоставления «входа», «процесса» и «выхода» все их множество подразделяется на непересекающиеся подмножества — ЭО управления, что позволяет получить однозначную информацию о них и описать особенности объекта управления на двух уровнях: качественном и количественном.

Перечень ТЭП содержит следующие восемь параметров: функциональное назначение, структурно-функциональную характеристику, решаемую задачу, конструктивно-технологическую базу, энергофункциональную характеристику, надежность, а также экономику и организацию производства ЭО. По этим параметрам для каждого из ЭО, входящих в структуру объекта управления (в данном

случае в структуру сборочной РТС), разрабатывается содержательная часть классификаторов ТЭП (как это показано в табл. 1.1 для ЭО «Промышленный робот»), которая представляет собой базу данных, служащих основой для построения информационно-поисковых систем и позволяющих осуществлять автоматизированное проектирование РТС. Вместе с тем база данных представляет собой полную характеристику элементарного объекта.

Наиболее общей характеристикой ПР является технологическая универсальность, зависящая от степени его совершенства, качества выполняемых им функций на производстве и переналаживаемости. Технологическая универсальность повышается с увеличением энергофункциональной вооруженности (ТЭП А5), совершенства захватных и исполнительных устройств, степени унификации

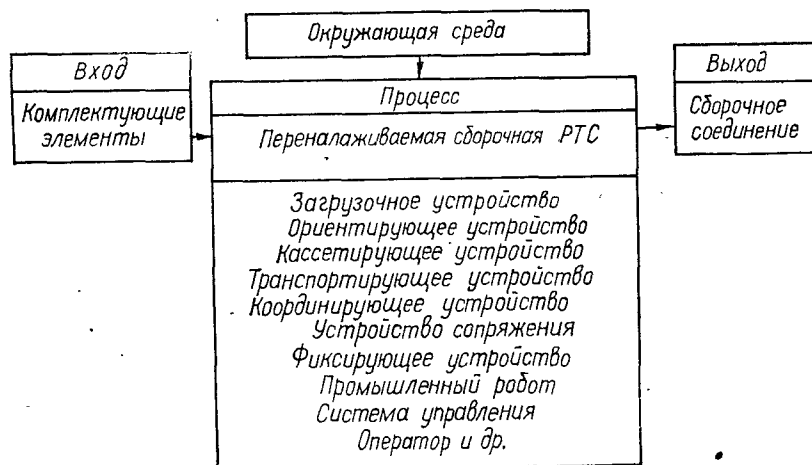


Рис. 1.2. Модель сборочного процесса

элементной базы (ТЭП А2 и А4), а также степени оучувствленности и приспособляемости к окружающей среде (ТЭП А1 и А2) ПР. Переналаживаемость для роботов с развитой кинематической структурой (ТЭП А5) зависит от полноты унифицированного ряда сменных технологических модулей (ТЭП А4) и типа системы управления (ТЭП А2), объема ее памяти и принятого способа программирования вплоть до автоматического самопрограммирования.

Структурно-функциональная характеристика (ТЭП А2) позволяет выбрать оптимальные соотношения между кинематической структурой, информационной полнотой и объемом вычислительных процессов ПР для выполнения поставленной перед ним задачи (ТЭП А3). Повышение степени оучувствленности и приспособляемости расширяет технологические возможности роботов, но в то же время приводит к резкому увеличению затрат на их производство и обслуживание. Поэтому следует стремиться к такому сочетанию основных структурно-функциональных элементов, чтобы информационная полнота об окружающей среде была необходимой и достаточной для успешного взаимодействия системы «робот — объект роботизации — среда». В частности, для производств с устойчивой номенклатурой выпускаемых изделий информацией жесткой программы координат положения рабочих органов манипуляционной системы ПР вполне достаточно для успешного взаимодействия с упорядоченной по наличию, положению и принадлежности или качеству изготовления предметов обслуживаемой средой. При этом все объекты (детали, оснастка, инструмент и др.) строго ориентированы в пространстве, их место расположения определено в базовой системе координат, бракованные объекты исключены из обслуживаемой среды.

В тех случаях, когда автоматические устройства упорядочения среды не могут обеспечить 100 %-ное ориентирование и координирование предметов и их

### 1.1. Классификатор ТЭП для ЭО «Промышленный робот»

ТЭП	Обозначение	Содержание	Источник выбора
Функциональное назначение	A1	Выполнение двигательных функций, аналогичных функциям человека, при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки: глобальные региональные локальные	Классификатор функций человека при обслуживании (выполнении) производственных процессов
Структурно-функциональная характеристика	A2	Модель ПР Основные структурно-функциональные элементы: исполнительное устройство устройство управления измерительное устройство устройство внешних связей манипуляционная система (МС) устройство передвижения рабочий орган МС захватное устройство МС (ЗУ) рабочий инструмент МС	Классификатор ПР
Решаемая задача	A3	Выполняемые задачи (функции): вспомогательные технологические универсальные Уровень специализации: специальные специализированные (целевые) многоцелевые	Классификатор видов ПР  Классификатор операций
Конструктивно-технологическая база	A4	Элементная база — конструктивные элементные модули: основания подъема руки качания руки выдвижения руки вращения руки вращения колонны вращения кисти и др.	Классификатор конструктивных элементных модулей
Энергофункциональная характеристика	A5	Система координат: прямоугольная декартова цилиндрическая сферическая угловая комбинированная	Объект роботизации. ТЭП «Решаемая задача», степень упорядочения среды, технологические планировки РТК

Продолжение табл. 1.1.

ТЭП	Обозначение	Содержание	Источник выбора
Энергофункциональная характеристика	A5	Координаты управления: радиальное перемещение поворот колонны поворот кисти и др. Количество переходов в цикле Рабочая зона ПР и др.	Объект роботизации, ТЭП «Решаемая задача», степень упорядочения среды, технологические планировки РТК
Эксплуатационная характеристика	A6	Грузоподъемность ПР (номинальная) Длина продольного перемещения звена МС Погрешность обработки траектории рабочего органа МС Погрешность позиционирования рабочего органа Усилие захвата Предельные условия эксплуатации: температура влажность колебания давления (напряжения) в сети и др.	Паспортные или статистические данные
Надежность	A7	Время безотказной работы Коэффициент готовности к работе Средняя наработка на отказ Среднее время восстановления Обобщенные показатели	Паспортные или статистические данные
Организация и экономика	A8	Срок окупаемости затрат Себестоимость и др.	Калькуляция

классификацию по принадлежности, а доупорядочение вручную представляет трудности или экономически неоправдано, эти функции передаются роботу, обладающему элементами осязания — сенсорными и тактильными датчиками. Технологические возможности таких роботов расширяются, а жесткая программа в процессе взаимодействия робота с окружающей средой дополняется информацией о ней от органов осязания. Роботы с элементами адаптации решают такие технологические задачи, как выполнение вспомогательных операций по обслуживанию сборочных позиций, а также могут самостоятельно выполнять простейшие технологические операции сборки и под сборки соединений с частичным фиксированием сопрягаемых (комплектующих) элементов (ТЭП А3).

Наибольшими технологическими возможностями обладают роботы, взаимодействующие с неупорядоченной средой. Такие роботы независимо от степени упорядочения среды должны выполнять комплекс действий, направленных на достижение главной цели, определяемой заданием (например, для сборки — сборочным чертежом). В этом случае сборочная операция выполняется роботом на основании сопоставления информации о собираемом изделии с полной информацией об окружающей среде. Общие действия типа «Определить сложность и тип сборочного соединения», «Выбрать комплектующие соединения детали из обслу-

живаемой среды», «По типу сборочного соединения запросить из памяти типовое решение» и другие выполняются на основании общего алгоритма управления. В то же время выбор базовой детали, определение последовательности (маршрута) сборки обеспечивается информацией (банком) типовых решений, которая может включать в свой состав и наборы отдельных жестких циклов программ координат положения рабочих органов ПР. Данные по конкретным деталям (их наличие, принадлежность к классам, качество изготовления, расположение в пространстве и т. п.) формируются на основании информации об окружающей среде сенсорными и тактильными датчиками, которыми снабжается ПР. В результате сопоставления перечисленных видов информации происходит автоматическое самопрограммирование алгоритма работы ПР, движения которого формируются, таким образом, в результате переработки нескольких видов информации и приспособления (адаптации) к окружающей среде.

Энергофункциональная вооруженность (ТЭП А5) в значительной мере определяется характером осуществляемых ПР движений. Глобальные (межпозиционные) перемещения выполняются роботом при обслуживании им производственных позиций, удаленных на значительные расстояния, и осуществляются с помощью одно- или многостепенных тележек, на которых устанавливается собственно манипуляционная система робота. Региональные (внутрипозиционные) движения совершаются в пределах рабочей зоны стационарного робота (геометрии обслуживаемого им пространства). Локальные (операционные) движения выполняются ориентирующими и операционными механизмами, входящими в состав манипуляционной системы ПР.

С расширением степеней подвижности манипуляционной системы ПР возрастает и его технологическая универсальность. Однако сопоставление стоимости (ТЭП А8) с энергофункциональной характеристикой (ТЭП А5) указывает на необходимость осторожного подхода к выбору типа ПР, рабочей системы координат, числа управляемых координат, количества переходов в цикле, оптимального использования возможностей рабочей зоны и др. Особенно важно выбрать рациональную компоновку ПР, правильно определить требуемый уровень информационного обеспечения и оптимальным образом организовать управление его работой в составе РТК, учитывая пока еще низкие показатели надежности работы (ТЭП А7) этого класса оборудования. Поэтому одним из направлений создания ПР, обеспечивающих возможность быстрой переналадки под новую решаемую задачу при минимальной энергофункциональной вооруженности роботов, а следовательно, при минимальных затратах на изготовление и максимально возможном увеличении показателей надежности (за счет исключения избыточности в структуре манипуляционной системы, информационном обеспечении и управлении) является использование принципа модульного (агрегатного) построения (ТЭП А4).

Наличие классификаторов ТЭП для всей номенклатуры ЭО робототехнологических комплексов способствует использованию формализованных методов описания решаемых задач, структуры и состава РТК с учетом физико-технологических и технико-экономических ограничений и позволяет переходить к собственно процессу проектирования оптимальных по составу и структуре РТК [74].

### 3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ (РОБОТИЗИРОВАННЫХ) ПРОЦЕССОВ

Производственная система определяется совокупностью преобразования материалов, энергии и информации и взаимосвязей между ними, которые характеризуют входы и выходы элементов системы и представляют собой абстрактное отражение такой совокупности.

Собственные свойства производственной системы целесообразно описывать на двух уровнях: качественном и количественном. Каче-

ственный уровень образуется из параметров, описывающих функцию и структуру системы, а количественный — из параметров, численно определяющих свойства системы. Поэтому реальную систему характеризуют не только совокупность преобразований и связей, но и отношения преобразований при существовании отношений связей. Именно отношения преобразований отражают их качественную и количественную стороны, тогда как отношения связей — характер взаимодействия между элементами реальной системы, в которых осуществляются преобразования.

Например, в реальной технической системе, структурная схема которой показана на рис. 1.3, а, имеется ряд элементов, обеспечивающих действие системы в соответствии с отношениями преобразований при наличии определенных отношений связей между элементами, аналитическая запись которых изоморфна графическому представлению на рисунке:

$$A_{\text{вх}} = A_1 \rightarrow B_1 = A_2' \rightarrow B_2 = A_3 \rightarrow B_3' = B_{\text{вых}};$$

$$A_2'' = B_4 \leftarrow A_4 = B_3''.$$

Отношения между данной системой и другими системами раскрывают связи  $A_{\text{вх}} = A_1$  и  $B_3' = B_{\text{вых}}$ ; отношения между элементами внутри системы определяются связями  $B_1 = A_2'$ ,  $B_2 = A_3$ ,  $B_3'' = A_4$  и  $B_4 = A_2''$ , а отношения преобразований —  $A_1 \rightarrow B_1$ ,  $A_2' \rightarrow B_2$  и т. д.

При решении задач анализа и синтеза производственных систем возникает необходимость выбора формы записи системы. Кроме рассмотренных выше, наиболее часто используется граф-запись, когда вершинами графа

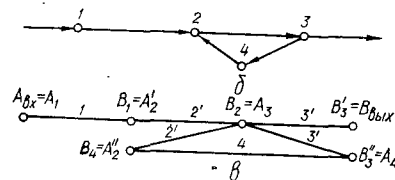


Рис. 1.3. Структурная схема технической системы (а), прямой (б) и обратный (в) графы записи системы

обозначаются отношения преобразований, а ребрами — отношения связей (рис. 1.3, б). Возможно также построение обратных графов, для которых отношения преобразований имитируются ребрами, а отношения связей (тождественных пар входов и выходов потоков материалов, энергии или информации) — вершинами графа (рис. 1.3, в). На более высоком уровне детализации описания удобнее пользоваться прямой формой граф-записи, на более низком уровне — обратной формой.

Формализация описания производственного процесса связана с описанием функций процессов как объектов управления, операций как совокупностей преобразований и связей в объекте управления, состава и функциональных задач элементов объекта управления как отношений

преобразований и связей, характеризующих эти элементы. Выделяется пять уровней детализации формализованного описания процессов [65]. Так, первый уровень можно представить функцией  $\Phi$  любого про-

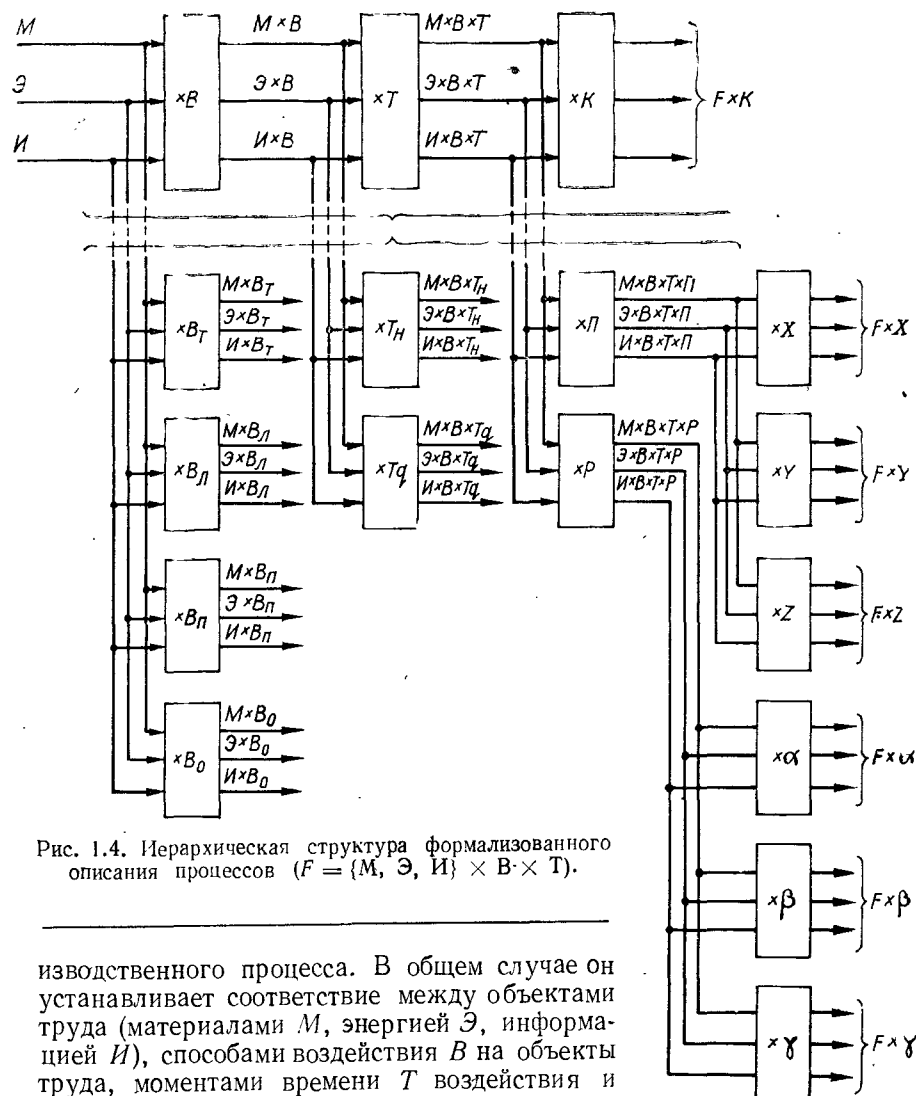


Рис. 1.4. Иерархическая структура формализованного описания процессов ( $F = \{M, \mathcal{E}, I\} \times B \times T$ ).

изводственного процесса. В общем случае он устанавливает соответствие между объектами труда (материалами  $M$ , энергией  $\mathcal{E}$ , информацией  $I$ ), способами воздействия  $B$  на объекты труда, моментами времени  $T$  воздействия и пространственными координатами  $K$  объектов труда (рис. 1.4), которое может быть описано декартовым произведением

$$\Phi\{M, \mathcal{E}, I\} \times T \times B \times K. \quad (1.1)$$

Подфункции ( $\Phi_n$ -процессы) предназначены для описания способа и времени воздействия на объекты труда и изменения их простран-

ственных координат

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{n1}(B, K) &\subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times T; \\ \Phi_{n2}(T, K) &\subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times B; \\ &\dots \dots \dots \\ \Phi_{n14}(\{M, \mathcal{E}, I\}) &\subset B \times T \times K. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Выражения (1.2) являются проекциями функциональных зависимостей, описывающих производственные процессы, на соответствующие координатные плоскости.

При дальнейшей детализации описания функции (1.1) можно выделить *второй уровень* — формализованное описание технологий, для чего в выражении (1.1) подставляется  $B = B_T \vee B_L \vee B_P \vee B_{об}$ . На этом этапе детализации описания определяется способ взаимодействия орудий и объектов труда и отражаются качественные изменения в развитии орудий труда, определяющие переход к новому классу технологий (к следующей стадии их развития). Коренные изменения характера этого взаимодействия позволяют выделить четыре класса технологий.

Первый из них характеризуется точечным  $B_T$  (индивидуальным) взаимодействием орудий с отдельными объектами труда и отличается малой производительностью.

Второй класс предусматривает линейное  $B_L$  воздействие орудий на объекты труда, либо одновременное воздействие на несколько объектов, расположенных, например, в ряд (строку). В этом случае производительность процессов растет линейно и пропорционально числу объектов.

Еще больше отличаются свойства технологий *третьего класса*, характеризующихся «поверхностным» взаимодействием  $B_P$  орудий и объектов труда, либо группы объектов, расположенных на поверхности (так называемое групповое воздействие на объекты труда). Производительность процессов при этом возрастает пропорционально рабочей поверхности орудия труда.

Четвертый класс технологий характеризуется пространственным взаимодействием орудий и объектов труда ( $B_{об}$ ), при котором появляется возможность, наряду с резким повышением производительности за счет одновременного воздействия на объем объекта (или объектов), увеличения вероятности осуществления производственного процесса или технологической операции.

На втором уровне детализации выражение (1.1) принимает вид

$$\Phi_T \subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times (B_T \vee B_L \vee B_P \vee B_{об}) \times T \times K. \quad (1.3)$$

Из условий определимости выражения (1.3) следует порядок выполнения  $\Phi$ -технологий для данного уровня описания.

*Третий уровень* детализации описания связан с установлением характера непрерывности взаимодействия орудий и объектов труда, для чего в выражении (1.3) подставляется  $T = T_n \vee T_d$ . На этом уровне выделяют непрерывные  $T_n$  (например, металлообработка резанием, прокатное производство, процессы преобразования информации в аналоговых машинах и др.) и дискретные  $T_d$  (например, сборочные про-

цессы, преобразование информации в цифровых вычислительных машинах и дискретных автоматах и др.) процессы. Различие в характере непрерывности взаимодействия орудий и объектов труда для непрерывных и дискретных производственных (технологических) процессов требует не только принципиально различных по функциональным свойствам орудий труда (а следовательно, различной их элементной базы), но и существенных отличий в организации производственных (технологических) процессов и их технологической подготовке. Порядок выполнения  $\Phi_n$ -процессов этого уровня формализации описания определяется из выражения

$$\Phi_n' \subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times (B_T \vee B_L \vee B_P \vee B_{об}) \times (T_n \vee T_d) \times K. \quad (1.4)$$

Выделение данного уровня формализации описания позволяет перейти к *четвертому уровню* детализации описания функций. Для этого в выражении (1.4) характеристика  $K$  пространственных координат объектов труда заменяется произведением  $\Pi \times P$ , где  $\Pi$ ,  $P$  — множества линейных и угловых координат. Таким образом,

$$\Phi_o \subset \{M, I, \mathcal{E}\} \times (B_T \vee B_L \vee B_P \vee B_{об}) \times (T_n \vee T_d) \times \Pi \times P, \quad (1.5)$$

где  $\Phi_o$  — функциональная операция ( $\Phi_o$ -операция).

Система выражений, определяющая функции орудий труда и представляющая собой функциональные операции, может быть получена из (1.5) установлением соответствия между переменными, входящими в выражение (1.5):

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{o1}(B, P) &\subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times (T_n \vee T_d) \times \Pi \\ \Phi_{o2}(B, \Pi) &\subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times (T_n \vee T_d) \times P \\ \Phi_{o3}(B) &\subset \{M, \mathcal{E}, I\} \times (T_n \vee T_d) \times \Pi \times P. \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Так, в частности, первые выражения системы (1.6) представляют собой описания функциональных операций, устанавливающих: соответствия во времени между объектами труда  $M$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $I$  и линейными координатами  $\Pi$  при несущественных изменениях или фиксированных значениях угловых координат  $P$  для определенного способа взаимодействия  $B_T$ ,  $B_L$ ,  $B_P$  или  $B_{об}$  орудий и объектов труда; соответствия во времени между элементами множеств  $M$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $I$  и  $P$  при несущественном изменении или фиксированных значениях  $\Pi$  для определенного способа взаимодействия  $B$  орудий и объектов труда; изменения во времени линейных  $\Pi$  и угловых  $P$  координат элементов, принадлежащих  $M$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $I$ , для определенного способа взаимодействия  $B$  орудий и объектов труда и т. д. Таким образом, выделенные на данном уровне формализации описания функции орудий труда позволяют установить их тип, т. е. функции орудий труда реализуются соответствующими типами функциональных машин (*МВТП*-машинной реализуется *МВТП*-операция, *ВТПР*-машинной реализуется *ВТПР*-операция и т. д.), принадлежащих исполнительной части производственных (технологических) систем.

*Пятый уровень* детализации описания соответствует функциональным переходам ( $\Phi$ -переходам). Множество  $\Phi$ -переходов формируется

детализацией множества линейных  $P$  и угловых  $R$  координат (движений), которые могут занимать (выполнять) орудия и объекты труда в процессе взаимодействия. Линейные координаты обеспечиваются функциональными устройствами определенных классов, позволяющими орудиям и объектам труда перемещаться по координатам  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , обеспечивая их транспортные движения или линейное позиционирование. Угловые координаты (ротация)  $\alpha_x, \beta_y, \gamma_z$  реализуются устройствами ротационного действия. При этом в зависимости от направления оси ротации во вращательных парах кинематических структур таких устройств можно обеспечить транспортные и ориентирующие движения орудиям и объектам труда. Например, продольно-вращательные пары  $P_n$  имеют оси вращения, совпадающие с продольными осями звеньев устройств, поэтому такими устройствами реализуются ориентирующие (ротационные) движения объектов и орудий труда; кривошипно-вращательные  $R_k$  пары имеют оси вращения, перпендикулярные продольным осям звеньев устройств, и обеспечивают перенос объектов с одновременным их разворотом вокруг оси в плоскости переноса. Данный уровень детализации позволяет выявить состав элементарных задач, решаемых на нижнем уровне, и формализовать их описание.

С учетом способа и условий непрерывности взаимодействия орудий и объектов труда, типа орудий труда и состава элементарных задач полная номенклатура функциональных устройств определяется декартовым произведением

$$\Phi_{\text{пер}} \subseteq \{(B_T \vee B_n \vee B_{\text{об}}) \times (T_n \vee T_d) \times X \times Y \times Z \times (\alpha_T \vee \alpha_K) \times (\beta_T \vee \beta_K) \times (\gamma_T \vee \gamma_K)\}, \quad (1.7)$$

позволяющим получить  $64 \times (2^{n-1} - 1) = 64 \quad (2^{8-1} - 1) = 8128$  фактор-множеств или функциональных устройств, на базе которых формируются любые производственные процессы. Необходимо также учитывать возможность одновременного выполнения  $(B_T \vee B_n \vee B_{\text{об}}) \times T_n \vee T_d \times X \times Y \times Z \times (\alpha_K \vee \beta_K \vee \gamma_K)$ -устройствами как задач транспортирования, так и задач ориентирования объектов и орудий труда.

Используя возможности формализованного описания производственных процессов с помощью граф-записи, выделенные на этапах детализации формализованного описания уровни можно представить следующим образом.

Из условий определенности функционального выражения (1.1) последовательность реализации  $\Phi$ -производственных процессов описывается орграфом, изображенным на рис. 1.5, а, где

$$a_1, a_2, a_3, a_4 \in \{M, \mathcal{E}, H\} \times K.$$

Аналогичным образом можно определить порядок выполнения  $\Phi$ -технологий, который следует из определенности выражения (1.3) и описывается изображенным на рис. 1.5, б орграфом;  $\Phi$ -технологических процессов, который следует из определенности выражения (1.4) и описывается соответствующим орграфом (рис. 1.5, в);  $\Phi$ -операций,

который следует из определенности выражения (1.5) и описывается орграфом на рис. 1.5, г.

В полном функциональном орграфе (ПФО) производственной автоматизированной системы (рис. 1.5, д) узлы соответствуют связям между преобразованиями, а также входным и выходным системам, а ребра — самим преобразованиям объектов труда. ПФО следует из определенности выражения (1.7) с учетом реализации продольно- и кривошипно-вращательных пар (рис. 1.5, е).

В реальных производственных условиях цепочки  $\Phi$ -операций могут выполняться одним комбинированным функциональным устройством.

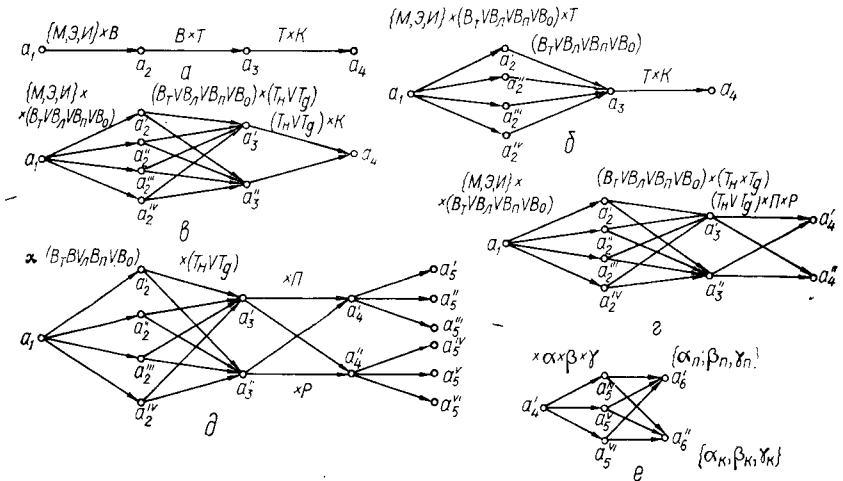


Рис. 1.5. Представление элементов производства в виде орграфов: а — производственных процессов; б — технологий; в — технологических процессов; г — операций; д — полный функциональный орграф (ПФО) производственной системы; е — ПФО с учетом реализации продольно- и кривошипно-вращательных пар

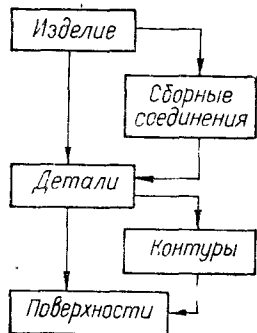
При использовании в качестве такого устройства промышленного робота автоматизированная техническая система становится робототехнической.

#### 4. МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ РОБОТИЗАЦИИ

При морфологическом описании объектов роботизации устанавливают и формализованно описывают лишь те их свойства, которые каким-либо образом влияют на разрабатываемую робототехническую систему или ее элементы.

Рассматривая объекты как механические системы тел и пользуясь критерием одновариантности членения системы на элементы, можно обосновать, например, следующие иерархические уровни для сборочных соединений (рис. 1.6). На первом уровне детализации описания, когда элементами изделия следует считать детали и структуру (геометрический образ) изделия, состав и взаимосвязи элементов можно описывать графом  $U = \{D, n\}$ , где  $D$  — множество деталей, а  $n$  —

множество связей между ними. Связь  $n_i \in N$  в структурном графе изделия является комплексной характеристикой взаимодействия деталей и при необходимости может указывать либо только сопряжение деталей, либо подвижность, либо метод фиксации соединения и т. п. В качестве примера в табл. 1.2 приведены структурные графы и маршруты сборки изделий «Стяжка», «Рычаг», «Плата с диодами» (исполнение I и II).



Если на первом уровне детализации определяются свойства, состав и структура изделий, то второй уровень детализации связан с описанием свойств и структуры деталей. При этом каждая из деталей рассматривается как система поверхностей, а ее структура описывается графом  $d = \{S, c\}$ , где  $S$  — множество поверхностей детали, а  $c$  — множество связей между поверхно-

Рис. 1.6. Иерархическая структура сборочного соединения

1.2. К представлению элементов изделия структурными графами

Объ- ект	Общий вид изделия	Граф изделия	Маршрут сборки
Стяжка			
Рычаг			
Плата с диодами			

### 1.3. Структурные графы многоэлементных изделий

$i \left( \frac{n_{\min}}{n_{\max}} \right)$	$n$	№ варианта	Степень вершины	Графическое изображение
$2 \left( \frac{1}{1} \right)$	1	1	(1, 1)	
$3 \left( \frac{2}{3} \right)$	2		(1, 2, 1)	
	3		(2, 2, 2)	
$4 \left( \frac{3}{6} \right)$	3	1	(1, 1, 2, 2)	
		2	(3, 1, 1, 1)	
	4	1	(2, 2, 2, 2)	
		2	(3, 2, 2, 1)	
	5	1	(3, 3, 2, 2)	
	6		(3, 3, 3, 3)	

бору подлежат только вершины  $d_1, d_2$  и  $d_3$ , число перестановок (возможных маршрутов) равно 3!, т. е. 6:

1.  $d_0 d_1 d_2 d_3$ ;
2.  $d_0 d_1 d_3 d_2$ ;
3.  $d_0 d_2 d_1 d_3$ ;
4.  $d_0 d_2 d_3 d_1$ ;
5.  $d_0 d_3 d_1 d_2$ ;
6.  $d_0 d_3 d_2 d_1$ .

Полученные маршруты оцениваются по условиям доступа, определенности базирования, направлению движения сопряжения, числу одновременно устанавливаемых связей.

Из каждого маршрута поэлементной сборки в общем случае можно получить несколько маршрутов с узловой подсборкой. Для этого необходимо в полученных выражениях возможных маршрутов сборки отбросить элементы приспособления  $d_0$  и выделить сочетания по 2, 3, ...,  $i - 1$  элемента таким образом, чтобы они соответствовали связанным подграфам структурного графа изделия (например,  $d_1 d_2, d_1 d_3, d_2 d_3$ ). Далее такие сочетания рассматриваются как элементы.

### 5. ИЕРАРХИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Иерархия роботизированного производства обусловлена этапностью работ в области промышленной робототехники от роботизации отдельных технологических позиций к комплексно роботизированному производству с объединением локальных систем управления позициями, комплексами, участками и линиями в систему управления от ЭВМ. Переход от создания отдельных роботизированных позиций к комплексно роботизированному производству сопровождается при этом как количественными, так и качественными изменениями, происходящими в производственных системах: организацией и подготовкой производства, структурой и составом элементов технических систем (рис. 1.7).

На первом этапе проводится тщательный анализ роботизируемого производства с обоснованием целесообразности внедрения ПР в технологические процессы и намечается очередность развития работ по роботизации технологических процессов на данном производстве; создаются средства упорядочения объектов, рекомендуемых для роботизированного изготовления (так называемые средства «жизнеобеспечения» промышленных роботов); формируются основные характеристики необходимых ПР и выбираются базовые модели ПР. Далее разрабатываются планировки роботизированных позиций и подготавливаются условия для роботизации отдельных технологических процессов. Таким образом, на первом этапе решаются задачи создания отдельных роботизированных позиций и их объединения в робототехнологические комплексы, а также накапливается опыт общения человека с принципиально новым классом гибких переналаживаемых средств автоматизации — промышленными роботами.

Второй этап характеризуется дальнейшим совершенствованием транспортных внутри- и межцеховых систем для обслуживания объединяемых в робототехнологические линии отдельных РТК. Одновременно решаются задачи повышения организационного уровня и информационного обеспечения роботизируемого производства, автоматизи-

рованного учета исходных материалов и конечного продукта в виде номенклатуры выпускаемых на роботизированных участках и линиях изделий, а также контроля качества этих изделий. Таким образом, создаются предпосылки для построения автоматизированных систем управления роботизированными технологическими процессами.

На *третьем этапе* подключаются отдельные АСУРТП к единой цеховой или заводской автоматизированной системе управления производством (АСУП) в целом. Таким образом, локальные АСУРТП становятся подсистемами общезаводской АСУП.

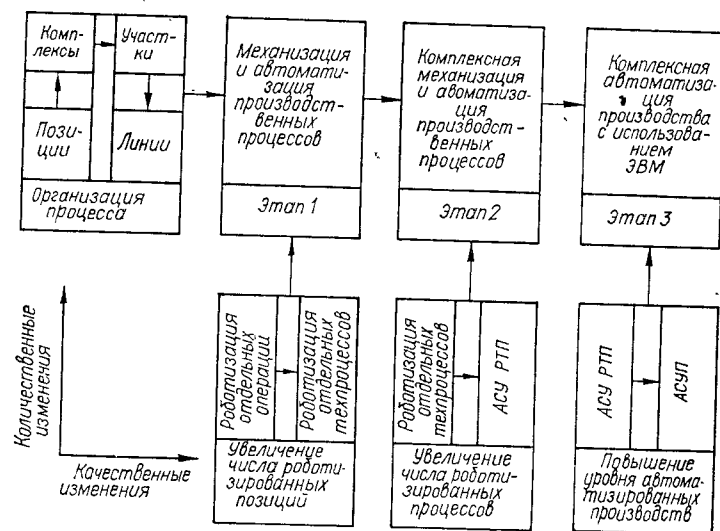


Рис. 1.7. Иерархическая схема роботизированного производства

Такая последовательность работ при создании роботизированных производств обеспечивается развитием материально-технической базы промышленной робототехники в нашей стране, основу создания которой представляет программа работ ГК СССР по науке и технике в области робототехники на 11-ю пятилетку.

## Глава II

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

#### 1. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА К ВНЕДРЕНИЮ ПР

Процессу внедрения ПР в производство предшествует ряд этапов его технологической подготовки, связанных со спецификой использования роботов в наиболее экономически рациональных технологических процессах.

Под технологической подготовкой производства в общем случае понимается комплекс работ по обеспечению технологичности конструкций изделия, проектированию технологических процессов и средств технологического оснащения, расчету технически обоснованных материальных и трудовых нормативов, потребного количества технологического оборудования и производственных площадей, внедрению технологических процессов и управлению ими в производстве, позволяющий приступить к выпуску нового изделия в заданных объемах.

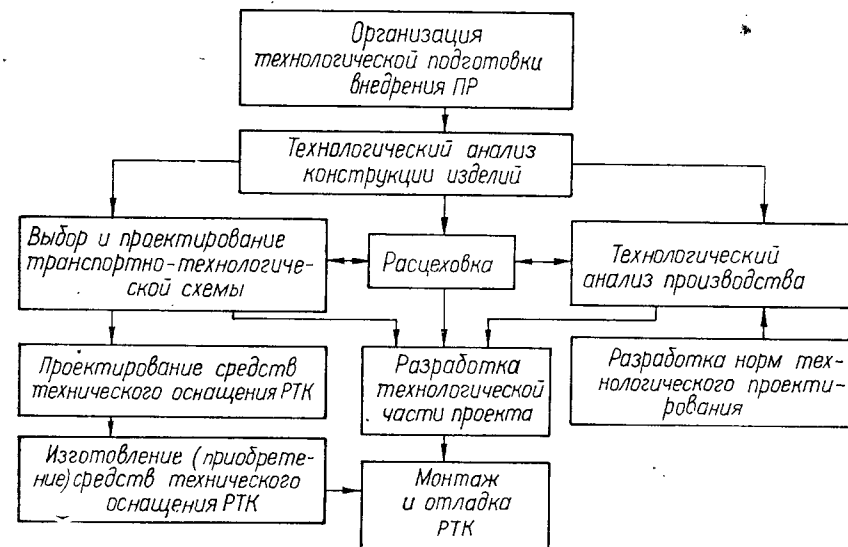


Рис. 2.1. Структурная схема технологической подготовки роботизированного производства

Технологическая подготовка роботизированного производства имеет свои специфические особенности, характеризующиеся использованием принципиально новых методологических основ построения технологического процесса с использованием переналаживаемых средств гибкой автоматизации — промышленных роботов, и состоит из ряда мероприятий, направленных на создание РТС [76].

Технологическая подготовка производства на предприятии, а также организация и управление ею регламентируется Единой системой технологической подготовки производства (ЕСТПП) — ГОСТ 14.001—73, ГОСТ 14.002—73, ГОСТ 14.102—73 и др. Каждый из этапов создания РТК (рис. 2.1) находится во взаимосвязи с основными подсистемами управления предприятием, а именно: технико-экономического и оперативно-календарного планирования, материально-технического снабжения и сбыта, подготовки кадров, энергетического, ремонтного и инструментального обслуживания производства, капитального строительства, конструкторской подготовки производства.

На каждом этапе решаются специфические для него задачи. Так, организация технологической подготовки внедрения ПР связана с пла-

нированием, контролем и учетом работ по роботизации производства. *Технологический анализ конструкций изделий* предусматривает проведение работ, обеспечивающих заданный уровень технологичности этих изделий и их компонентов с учетом использования ПР. Для *технологического анализа производства* характерны задачи определения производственной мощности групп оборудования, обслуживаемых ПР, с учетом существующих площадей, а также оценка возможностей и целесообразности перестройки технологических процессов и определение рациональных уровней их автоматизации. На этапе разработки *технологической части проекта* решаются задачи подготовки исходных данных к проектам РТК, в том числе производится обоснование состава и количества комплектующего оборудования и производственных рабочих площадей, запасов материалов и оснастки, энергетических затрат и технико-экономических показателей эффективности внедрения ПР. *Монтаж и отладка РТК* включают разработку монтажного плана, выполнение монтажных работ и отладку робототехнологических комплексов, изготовление опытной партии, проведение приемосдаточных испытаний и освоение запланированных производственных площадей РТК. Этап *выбора и проектирования транспортно-технологической схемы* связан со структурным анализом изделия, в частности, для сборочных соединений — возможностью дифференциации или концентрации операций, с выбором оптимального маршрута сборки, типизацией процессов и группированием изделий, серийностью производства и т. п. Этапы *проектирования и изготовления (приобретения) средств технического оснащения РТК* обусловлены результатами анализа уровня технологичности объектов роботизации, под которыми принято понимать детали и сборочные соединения, изготавливаемые на робототехнических системах. Следовательно, объектом роботизации является также и технологический процесс изготовления деталей и сборочных соединений на РТС.

Одной из основных задач, стоящих перед технологическими службами предприятий, является использование таких организационных и технологических мероприятий, которые позволяют сократить цикл технологической подготовки производства и прямо влиять на снижение ее трудоемкости при переходе на выпуск новых изделий. К таким мероприятиям относятся использование принципов стандартизации, типизации и унификации объектов роботизации, что особенно важно при низкой экономической эффективности внедрения РТС в условиях мелкосерийного производства. Опыт показывает, что наибольший эффект обеспечивается при внедрении роботов в серийное и крупносерийное производства с годовым объемом выпуска изделий 10...100 тыс. ед.; с меньшим объемом выпуска наиболее целесообразно ручное механизированное производство, а для большей серийности целесообразно использование специализированных автоматов. Для расширения области эффективного использования ПР в мелкосерийном и серийном производствах технологическая подготовка роботизированного производства должна предусматривать широкое применение принципов типизации технологических процессов и группового метода производства.

*Типизация технологических процессов* — основное направление технологической унификации, основу которой представляет классификация деталей и их поверхностей по группам и конструктивно-технологическим признакам. Под типизацией понимают создание основных технологических процессов для изготовления всех деталей (сборочных соединений) данного класса, базирующихся на сходных высокопроизводительных методах обработки и сборки с использованием современных механизированных и автоматизированных средств и орудий труда. Таким образом, тип детали (соединения) представляет совокупность деталей (соединений), характеризующую общность технологического процесса. Поэтому целью классификации является определение всей номенклатуры типовых деталей, а целью типизации технологических процессов — обобщение передовых приемов изготовления объектов роботизации и на этой основе создание типовых технологических (роботизированных) процессов изготовления однотипных объектов.

*Групповой метод* производства является современной прогрессивной ступенью развития унификации технологии. Основным признаком классификации и группирования объектов роботизации в этом случае являются применяемые средства технологического оснащения. Группа — это совокупность деталей (соединений), которая при изготовлении характеризуется общностью оборудования, оснастки, наладки и операционного технологического процесса. Группа деталей при групповом производстве представляет собой единство конструктивных (форма, размеры, требования качества сопряжения), технологических (общность технологии и оснащения) признаков, а также единство планирования и организации производства (организационно-плановые признаки). При групповом методе производства изделий создаются предпосылки использования в полном объеме преимуществ ПР как универсальных и переналаживаемых средств гибкой автоматизации, так как все компоненты РТС — групповые приспособления, универсально-сборочное оснащение технологических позиций — позволяют не только резко сократить затраты на подготовку производства и сроки ее проведения, но и обеспечить достаточную степень оснащения производства высокопроизводительными средствами подготовки среды (ориентирующими, загрузочными, транспортными, контрольно-измерительными и др.). В свою очередь, создаются предпосылки изготовления различных объектов группы по общему технологическому маршруту и реорганизацией предметно-замкнутых участков и многопредметных поточных линий в гибкое автоматизированное производство на базе переналаживаемых РТС. При этом в условиях мелкосерийного и серийного производств обеспечивается переход к эффективным высокопроизводительным методам, характерным для крупносерийного и массового производств.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ РОБОТИЗАЦИИ

Выделяют два пути проектирования роботизированного производства: роботизации подвергается существующий производственный (технологический) процесс; разрабатывается новый процесс изготовления изделий с использованием ПР.

Последний вариант более рационален и перспективен, так как позволяет в полной мере использовать типовые технологические решения и групповые методы производства, а также шире внедрять принципы агрегатирования при построении РТС из унифицированных элементов.

Однако в настоящее время в эксплуатации находятся технические системы, реализующие традиционные технологические решения, в которых не используются ПР. Поэтому задача автоматизации существующих технологических процессов с наименьшими материальными, временными и трудовыми затратами выдвигается в число первостепенных. Основу технологической подготовки роботизированного производства на базе существующих технологических процессов изготовления (сборки) изделий представляет технологический анализ последних как объектов роботизации [61].

Анализ технологических процессов базируется на следующих положениях: 1) участие ПР в производственном процессе возможно только в составе РТС; 2) формирование требований к ПР для данного вида производства должно учитывать возможность переналадки робота под другую номенклатуру изделий; 3) анализ производства должен учитывать степень его подготовки к автоматизации на базе ПР, в том числе — степень детализации процесса (дифференциации или концентрации операций), возможность внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию с целью повышения технологичности объекта роботизации, возможность приобретения комплектующих элементов РТС; 4) анализ должен проводиться отдельно для каждого из видов технологических процессов (механообработка, термообработка, сборка и т. п.); 5) анализ следует проводить методами качественной и количественной оценки возможных вариантов построения РТС (качественная оценка содержит перечень показателей технологичности объекта с учетом его роботизированного изготовления, количественная определяет технико-экономическую целесообразность разработки РТС для данного объекта роботизации).

Обработка на технологичность\* конструкций деталей, узлов, машин и механизмов является одним из важнейших элементов технологической подготовки производства. При оценке технологичности учитывается ряд предъявляемых к объекту требований. В частности, при оценке технологичности деталей учитываются соотношение исполнительных размеров, точности и шероховатости поверхности, а также физико-механических свойств материала изготовления; форма деталей и наличие осей и плоскостей симметрии; наличие явно выраженных ориентирующих элементов на поверхностях и минимального количества устойчивых различных положений; удобство базирования для обеспечения собираемости и возможности захвата; оптимальные весовые и габаритные характеристики с учетом обслуживающих средств (в том числе и ПР).

\* Технологичность — это особое свойство конструкций машин, узлов и деталей, при котором обеспечиваются их высокие технические и эксплуатационные характеристики с минимальными затратами общественно-полезного труда на изготовление в короткие сроки в условиях рационального использования оборудования и материалов.

При оценке технологичности сборочного соединения учитываются количество деталей одного класса и количество классов деталей в соединении; возможность деления соединения на под сборки; характер соединения и вид фиксации комплектующих деталей; возможность применения минимального числа обслуживающих роботов при комплектации соединения; возможность доступа захватными органами ПР к комплектующим деталям в соединении; количество сопрягаемых поверхностей и виды сопряжений; наличие у деталей направляющих фасок, а также центрирующих, фиксирующих и компенсирующих в составе РТС устройств и др.

В сборочном процессе в целом прежде всего следует обращать внимание на оптимизацию траектории перемещения объектов, выполняемого промышленными роботами. Траектория должна иметь минимальную протяженность и содержать ограниченное количество криволинейных участков; сопряжение ее прямолинейных участков должно обеспечиваться возможно большими радиусами; при этом число опорных точек траектории должно быть минимальным, а отрезки между этими точками — по возможности набираться из стандартных отрезков (прямая, наклонная, дуга определенного радиуса).

Непременным условием технологичности объектов роботизации является их кондиционность, что обеспечивается соблюдением технологической дисциплины на предыдущих переделах изготовления.

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ОБСЛЕДОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВА

Проведение работ по обследованию производства осуществляется в десять этапов (табл. 2.1). *Первый этап* — выявление рабочих мест и технологических процессов, подлежащих роботизации. В качестве критериев, определяющих целесообразность роботизации того или иного рабочего места или технологического процесса, могут служить: наличие циклически повторяющихся, однообразных трудовых движений рабочего по неизменяющейся от цикла к циклу траектории; наличие неблагоприятных условий труда (работа с вредными для здоровья материалами, работа в условиях повышенной опасности травматизма и т. п.); высокая трудоемкость загрузочных и транспортных операций; возможность перехода к групповой технологии обработки (сборки) деталей; возможность применения типовых методов автоматического контроля деталей в каждом цикле; необходимость обеспечения высокого коэффициента загрузки, коэффициента сменности и ритмичности работы технологического оборудования и др.

При анализе трудовых движений рабочего следует учитывать, что сходные по своему функциональному назначению рабочие движения ПР и человека могут быть выполнены несходными функциональными элементами (органами) человека и ПР. Так, например, операция транспортирования объекта в горизонтальной плоскости (поворот колонны и выдвижение руки ПР) может быть выполнена человеком за счет перемещения только руки без поворота корпуса.

## 2.1. Последовательность проведения работ по обследованию производства

№ п/п	Этап	Цель работы
1	Выявление отдельных рабочих мест и технологических процессов, подлежащих роботизации	Оценить степень тяжести и вредности труда, показать количество и последовательность трудовых движений рабочих, а также загрузку рабочего места
2	Анализ номенклатуры и программы выпуска изделий на отобранных для роботизации рабочих местах	Выявить группы однородных объектов роботизации
3	Идентификация объектов роботизации и анализ их технологичности	Провести классификацию объектов роботизации и выполнить анализ технологичности объектов
4	Выбор вспомогательного оборудования РТК и захватного устройства ПР	По данным п. 3 определить функции, которыми должно обладать вспомогательное оборудование РТК, и выбрать его состав и тип (модель)
5	Составление циклограммы движения ПР	Составить циклограммы движения ПР и выделить зоны обслуживания
6	Выбор требуемых ПР	Выбрать по данным п. 3 модели требуемых ПР
7	Планировка РТК с выбранными ПР	Выбрать типовые структуры РТК и начертить их планировку
8	Выбор базовой модели ПР для данного производства и определение степени модернизации	Определить базовую модель ПР
9	Технико-экономические расчеты и определение основных параметров РТК	Провести технико-экономические расчеты и определить параметры РТК
10	Выбор оптимального РТК	Провести оптимизацию выбора РТК по составу и структуре с учетом производственных возможностей

Исходным критерием возможности применения ПР на производстве можно считать условие [76]  $\sum_{i=1}^n t_{ц.п} P_i < \sum_{i=1}^n t_{ц.п} R_i$ , откуда  $\sum_{i=1}^n t_{ц.п} \times R_i / \sum_{i=1}^n t_{ц.п} P_i = K'_6 > 1$ ;  $K'_6$  — коэффициент быстродействия ПР;  $\sum_{i=1}^n t_{ц.п} R_i$  — время цикловых потерь или суммарное вспомогательное время на  $i$ -е число приемов или микроэлементов движения человека при выполнении технологической операции;  $\sum_{i=1}^n t_{ц.п} P_i$  — суммарное вспомогательное время на  $i$ -е число перемещений рабочего органа манипулирующей системы ПР при выполнении аналогичной с человеком технологической операции.

На *втором этапе* — анализ номенклатуры и программы выпуска изделий — номенклатура деталей, изготавливаемых (собираемых) на отобранных для роботизации рабочих местах, подразделяется на два вида (деление производится по результатам анализа данных формы 2.1, заполненной на основании технической документации).

Форма 2.1

Производственный процесс \_\_\_\_\_

Технологический процесс (рабочее место) \_\_\_\_\_

Цех \_\_\_\_\_

Признак	Шифр изделия			
Время обработки (сборки) одной детали (узла), с				
минимальное				
максимальное				
Размер партии, шт.				
Количество партий в месяц, шт.				
Годовая программа выпуска, шт.				
Среднее время, затрачиваемое рабочим на установку и съём одной детали (сборку одной сборочной единицы), с				
Количество рабочих, занятых в одну смену, чел.				
Разряд работ				
Стоимость нормо-часа, коп.				

К первому виду относятся детали, запускаемые в производство в минимально допустимом объеме партии, размеры, конфигурация, масса и материал которых позволяют ориентировать и захватывать эти детали с помощью какого-либо известного типа захватного устройства (механического, электромагнитного, вакуумного, струйного и т. д.).

Минимально допустимый объем партии запуска деталей (узлов), который целесообразно изготавливать (собирать) с помощью ПР,

можно ориентировочно определить из зависимости  $N_{\min} \approx (5 \dots 15) \times M_{\text{ц}} \tau_{\text{ц}}$ , где  $M_{\text{ц}}$  — цикловая производительность РТС, детали/мин;  $\tau_{\text{ц}} = 20 \dots 60$  мин — средняя длительность переналадки РТС.

В случае, если объем партии меньше рекомендуемого (полученного на основании расчета), следует перейти к групповой обработке (сборке). Ко второму виду относятся детали, не удовлетворяющие перечисленным выше требованиям.

На *третьем этапе* — идентификация — отобранные для изготовления (сборки) в условиях роботизированного производства детали делятся на классы. Классификация производится по конструктивно-технологическим признакам с учетом возможностей ПР и вспомогательного оборудования робототехнической системы.

Выделенные таким образом классы деталей заносятся в форму, аналогичную форме 2.1, но с отображением следующих признаков: форма детали; соотношение размеров; масса; наличие осей и плоскостей симметрии; характеристики (физические), обеспечивающие возможность ориентирования; механические свойства детали и материала; устойчивость; свойства деталей при контакте друг с другом; магнитные и электрические свойства материала; качество поверхностей.

Перечисленные признаки позволяют определять (идентифицировать) состав вспомогательного оборудования РТК, грузоподъемность ПР и тип захватного устройства (ЗУ) при наличии соответствующих классификаторов [35, 76, 81].

Количественную оценку технологичности объектов роботизации определяют на основании следующей информации об оборудовании РТК: выпускается серийно, выпущена опытная партия, имеется конструкторская документация без изготовления опытного образца, имеются только научные разработки без конструктивного решения, необходима оригинальная разработка.

На *четвертом этапе* — выбор вспомогательного оборудования РТК и захватного устройства ПР — уточняются их функции в составе РТК, а также определяются модели типовых представителей соответствующих классов, идентифицированных с классами выделенных объектов роботизации. При этом учитываются особенности объекта, технологического процесса и условия взаимодействия оборудования с объектами роботизации (для захватных устройств, например, это условия захвата и удержания деталей).

Свойства объектов роботизации определяют структурно-функциональную характеристику и конструктивную базу вспомогательного оборудования и ЗУ. Например, тела вращения целесообразно захватывать механическими рычажными, цапговыми или гравитационными призматическими ЗУ; для плоских объектов типа «кольцо» возможно применение струйных ЗУ. Кроме того, форма объекта влияет на выбор зажимного элемента и их количество в ЗУ.

Такое свойство, как масса, указывает на требуемое усилие удержания объекта в ЗУ, которое зависит от конструкции ЗУ, т. е. от усиленно-передаточного звена и соотношения между его элементами. Кроме того, на силовые характеристики механических ЗУ влияет тип привода и его конструктивное исполнение. В случаях, когда необхо-

димо управлять усилием захвата, целесообразно применять гидравлический, пневматический или электрический привод.

На выбор конструкции ЗУ влияют также механические свойства материала, из которого изготовлен объект. Например, при захвате объектов роботизации из хрупких и упругих материалов необходимо управлять процессом и усилием удержания. Для объектов из таких материалов используются ЗУ с элементами очувствления\*. Учет электрических свойств материала позволяет ориентировать объекты в электрическом поле, а также захватывать объекты из диэлектриков с помощью электростатических ЗУ. Использование магнитных свойств материала дает возможность не только производить захват и удержание, но и переориентацию объектов в пространстве, а также находить объект на позиции захвата при неточном выведении ЗУ в область расположения объекта.

Для захвата объектов небольшой массы широко применяют вакуумные и струйные ЗУ. Грузоподъемность последних зависит от создаваемого аэродинамического усилия, а вакуумных — от размеров присосов и величины создаваемого разрежения.

Вспомогательное оборудование (устройства) РТК можно разделить на три группы: загрузочно-разгрузочное, транспортирующее и ориентирующее\*\*.

*Пятый этап* предусматривает построение циклограммы движения ПР на основе последовательности рабочих движений оператора.

*Шестой этап* — выбор ПР — проводится с учетом требований к ПР, накладываемых технологическим процессом (операцией), а также объектом роботизации. Требования заносятся в форму с признаками: грузоподъемность, кг; число степеней подвижности; характеристика рабочей зоны (пределы перемещений колонны, руки, кисти); число степеней ориентирующих движений; число точек позиционирования; точность позиционирования, мм (град); скорость перемещения (руки по координатам, кисти); тип системы управления; наличие элементов адаптации. Выделяют следующие группы требований: технологические, эксплуатационные, экономические.

Технологические требования устанавливают функциональные характеристики ПР, необходимые для его применения в составе организуемого РТК. Так, номинальную грузоподъемность и предельное значение ускорения при перемещении устанавливают после анализа объектов роботизации (конфигурация, масса, физические свойства), изготовление (сборка) которых будет производиться при работе РТК. Грузоподъемность является основным количественным показателем только для вспомогательных ПР, а для технологических ПР грузоподъемность — технологический показатель процесса.

Геометрические характеристики рабочей зоны, способ установки ПР на рабочем месте, число степеней подвижности определяются при разработке компоновочных схем и планировок РТК.

\* См. гл. VI.

\*\* См. гл. III.

## 2.2. Технические характеристики

Параметр	ПМР-0,5-154-КПВ	ПМР-0,5-254-ПВ	ПМР-0,5-128-К	ПМР-0,5-254-КС	ПМР-0,2-126-КП
Количество степеней подвижности	4	3	2	3	3
Горизонтальные перемещения:					
расстояние, мм	254	254	200	254*	126
средняя скорость, мм/с	400	400	400	400	300
Вертикальные перемещения:					
расстояние, мм	50	50	35	35	40
средняя скорость, мм/с	100	100	100	100	80
Точность позиционирования, мм	0,29**	0,29	0,05	0,05	0,05
Тип системы управления	Позиционная		Временно-цикловая	Позиционная	
Масса переносимого груза, кг	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2

Параметр	РО-3	ПР-3-Р	ПР-4	«Универсал-5»	«Циклоп-3Б» (двуручий)
Количество степеней подвижности	4	2	6	6	4
Горизонтальные перемещения:					
расстояние, мм	225	1290	600	700	600
средняя скорость, мм/с	—	—	—	870	400
Вертикальные перемещения:					
расстояние, мм	105	1000	150	800	100
средняя скорость, мм/с	—	30—40	—	300	83
Точность позиционирования, мм	0,05	5	0,1	2	0,1
Тип системы управления	Позиционная	Цикловая		Позиционная	
Масса переносимого груза, кг	1,5	2,5	5	5	6

\* Продольное, 330 — поперечное.  
\*\* В радиальном направлении 50°.

Вид управления, число точек и точность позиционирования, число ориентирующих степеней подвижности устанавливаются в результате анализа технологического процесса (операции).

Скорость перемещения рабочих органов устанавливается в зависимости от требуемых скоростей выполнения операций, обуславливающих производительность РТК.

Эксплуатационные требования к ПР не являются специфичными и поэтому определяются аналогично другому технологическому оборудованию.

## некоторых серийно выпускаемых ПР

Тип ПР										
ПМР-0,2-110-КВ	ПМР-0,2-110-К	РС-4	РС-6	РС-222	МП-9	МН-063	РФ-1001С	РФ-201М	«Стрел-3» (двуручий)	РПО-1,25 (двуручий)
3	2	5	4	4	3	4	5	4	3—4	4
110 300	110 300	255 400	240 400	240 400	150 300	500 200	500 500	2000 400	150 400	500 1500
30 80 0,05	30 80 0,05	48 100 0,05	48 100 0,05	48 100 0,05	30 100 0,2	40 100 0,2	400 200 0,5	30 60 0,2	50 400 0,1	125 500 0,1
Цикловая		Позиционная		Цикловая		Позиционная		Цикловая		
0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,2	0,63	1	0,2	0,6	1,25

Продолжение табл. 2.2

Тип ПР									
«Бриг-10»	ПР-10И	ПР-10С	«Универсал-15М»	3388 (двуручий)	Гном-2 (двуручий)	РКТБ-4	МАРС-1 (двуручий)	МАК-1	ПРК-20
4	4	4	6	4	3	3	4	5	6
600 600	530 800	580 800	1000 400	600 1000	120 800—1000	90 90	370 500	1100 1000	1500 500
100 300	200 500	200 500	— —	50—100 700	80 700—1000	70 90	300 300	400 500	1500 500
—	0,3	0,5	3	0,15	0,1	0,2	1	0,5	3
Цикловая		Позиционная		Цикловая					
10	10	10	15	20	1	0,2	1	5	20

Экономические требования определяют стоимость ПР и затраты, связанные с его эксплуатацией, и устанавливаются из условий обеспечения требуемого экономического эффекта.

Основные характеристики некоторых серийно выпускаемых ПР приведены в табл. 2.2. Данные по серийно выпускаемому оборудованию заносятся в форму, аналогичную форме 2.1, но имеющую следующий состав признаков: стоимость единицы оборудования, руб.; действительный фонд работы, г; фактический коэффициент загрузки; производственная площадь, занимаемая оборудованием, м<sup>2</sup>; стоимость

1 м<sup>2</sup> производственной площади, руб. В случае, если необходимое оборудование серийно не выпускается, разрабатывается техническое задание на его проектирование.

Если среди выпускаемых ПР отсутствуют модели с требуемыми характеристиками или приобрести их невозможно, необходимо произвести повторный анализ технологического процесса (операции) и объектов роботизации с целью изменения отдельных требований к ПР, что позволит применить существующие модели. Если же и в результате повторного анализа выбрать ПР не представляется возможным, необходимо разработать техническое задание на проектирование (или доработку) ПР и сформулировать в нем общие требования к ПР.

Выбор типовых структур РТК составляет содержание работ по *седьмому этапу*. Основу построения в действующих производствах составляет анализ типовых схем расположения оборудования в цехах предприятий. Анализ показывает, что существует объективная связь между габаритами технологического оборудования и параметрами, характеризующими область рабочего места. Кроме того, на компоновку РТС оказывают влияние особенности обслуживаемых роботами технологических процессов, требования охраны труда и техники безопасности наладчика-оператора при проведении работ по «обучению», смене инструмента и оснастки, профилактических осмотрах и т. д.

На основании анализа различных структур РТК можно выделить следующие основные схемы их размещения в механообрабатывающих и сборочных цехах (рис. 2.2):

РТК-1 (рис. 2.2, а) — один робот (автономный или встроенный) обслуживает одну технологическую единицу. Возможно территориальное объединение РТЕ по признаку однотипности обслуживаемого технологического оборудования или операций; что создает удобство в обслуживании и наладке РТЕ. Такая компоновка предусматривает наличие питателей 2, обеспечивающих промышленные роботы 4 упорядоченными по наличию, принадлежности к классу и положению заготовками для дальнейшей загрузки технологического оборудования 1. Функции оператора 5 сводятся к наблюдению за правильностью функционирования элементов РТЕ;

РТК-2 (рис. 2.2, б) — один робот обслуживает группу из двух — четырех единиц технологического оборудования. Работа ПР 4, технологического оборудования 1 синхронизирована с работой подводящей А и отводящей D транспортных систем таким образом, что выполнение отдельных операций на одной из единиц технологического оборудования позволяет обслуживать роботом вторую единицу оборудования. Одновременно ПР может заменить инструмент и оснастку, расположенные в магазинах 2 и 3 соответственно. Оператор 5 производит наладку оборудования, «обучение» робота и следит за функционированием элементов РТЕ;

РТК-3 (рис. 2.2, в) — несколько промышленных роботов и единиц технологического оборудования с транспортными межоперационными связями, питателями и накопителями объектов труда представляют единое целое и объединены единым технологическим процессом преобразования материальных объектов. Питатель 2 с помощью транс-

портной системы А на входе РТК обеспечивает подачу на позицию обслуживания промышленного робота 4 упорядоченные по положению и принадлежности к классу заготовки для загрузки технологического оборудования 1. После завершения очередной операции роботы перегружают полуфабрикаты с оборудования на межоперационную транспортную систему А—D, подготавливая, таким образом, загрузку следующей единицы оборудования с помощью соответствующего ПР. После завершающей операции готовое изделие складывается очеред-

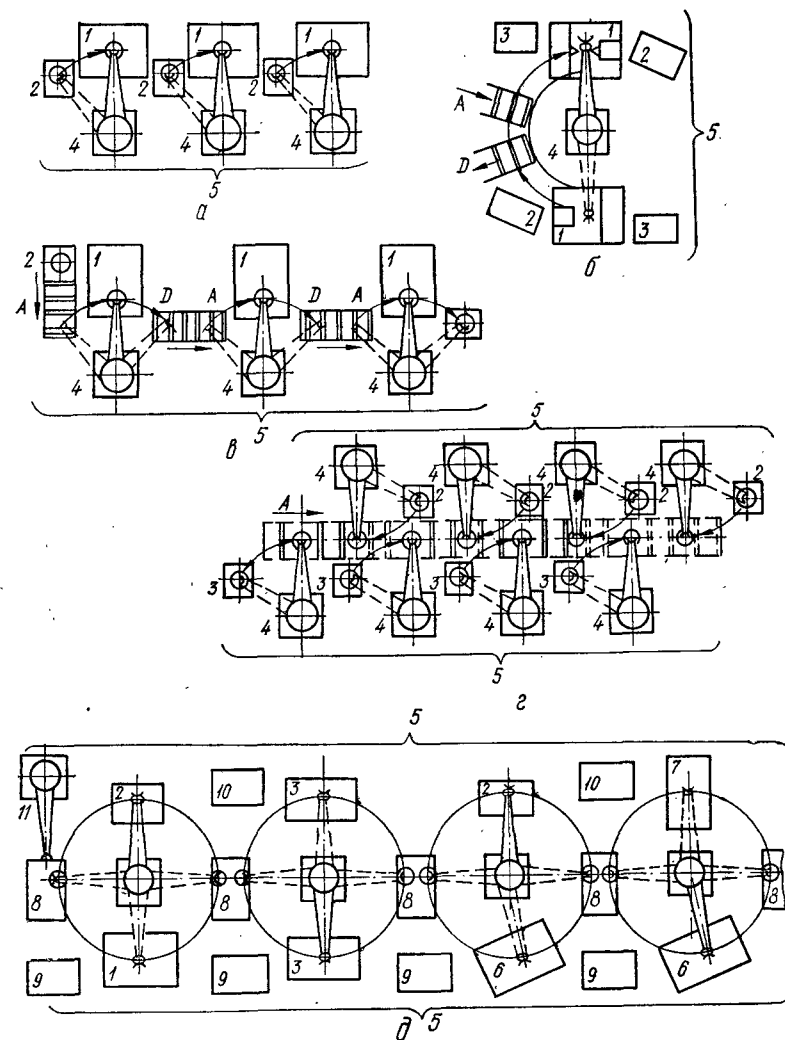


Рис. 2.2. Структурно-компоновочные схемы робототехнологических комплексов РТК-1 (а), РТК-2 (б), РТК-3 (в), РТК-4 (г) и РТК-5 (д)

ского оборудования 1. После завершения очередной операции роботы перегружают полуфабрикаты с оборудования на межоперационную транспортную систему А—D, подготавливая, таким образом, загрузку следующей единицы оборудования с помощью соответствующего ПР. После завершающей операции готовое изделие складывается очеред-

ным ПР в накопитель 3. Функции оператора 5 аналогичны рассмотренным выше;

РТК-4 (рис. 2.2,з) — число технологических единиц превышает количество обслуживающих их роботов. При такой компоновке выделяется несколько предметных участков с законченным циклом преобразования объектов труда (в частности, подборок сборочного соединения), а весь технологический процесс сборки изделия объединяется транспортной системой. Объединенные таким образом в единую роботизированную линию РТК последовательно комплектуют сборочное соединение на транспортном конвейере. Это обеспечивается установкой ПР 4 на базовые детали (расположенные на транспортере) комплектующих элементов соединения, находящихся в накопителях 2 и 3 в упорядоченном по наличию, положению и принадлежности к классу состоянии. В случае отсутствия очередного элемента в накопителе или наличии бракованного (неориентированного) элемента, накопители доупорядочиваются операторами 5, обслуживающими линию;

РТК-5 — роботы различной сложности, используемые в роботизированных производственных системах. В этом случае выделяются предметные участки, формируемые по принципу завершенности операций и процессов. В частности, на рис. 2.2,д изображена компоновка роботизированного участка, включающего технологическое оборудование 1, 3, 6 и 7, промышленные роботы 4 различной сложности, накопители 2 с упорядоченными по наличию, положению и принадлежности к классу объектами труда и межоперационные связи 8, на которых могут производиться сопутствующие или контрольные операции (гибка, лужение, мойка, зачистка и т. п.). Технологическое оборудование снабжается индивидуальными стойками 9 локального управления, а участок в целом управляется от мини-ЭВМ 10, являющимися временно элементами сопряжения с верхним уровнем иерархии — центральным процессором, осуществляющим управление производственной системой. Функции операторов 5 расширяются, и теперь они не только следят за правильностью функционирования участка, но также обслуживают средства и системы управления участком.

Для всех приведенных структур можно принять три основные схемы взаимного расположения оборудования и роботов: линейная (рис. 2.2,а, в), круговая (2.2,б) и линейно-параллельная (рис. 2.2, г, д).

*Восьмой этап* — выбор базовой модели ПР для данного производства и определение степени модернизации. Сравнивая характеристики ПР, выбранных для отдельных классов объектов роботизации, а также зная схему РТК, выбираем базовую (оптимальная) модель ПР для данного производства или (если такой модели не существует) составляем требования на доработку и определяем степень модернизации наиболее приближающейся к требуемой существующей модели ПР.

*Девятый и десятый этапы* — проведение технико-экономических расчетов и оптимизация основных параметров РТК. После выбора структурно-компоновочных схем РТК и определения состава вспомогательного оборудования необходимо заполнить форму 2.2.

Предприятие \_\_\_\_\_

Вид производства \_\_\_\_\_ Цех \_\_\_\_\_

Перечень основных параметров РТК для \_\_\_\_\_  
(наименование рабочего места)

Параметр	Технические данные РТК типа			
	РТК-1	РТК-2	РТК-3	РТК-4
Производительность, шт./мин				
Количество высвобождаемых рабочих одним РТК, чел.				
Количество и тип роботов в РТК, шт.				
Количество технологических единиц в РТК, шт.				
Площадь, занимаемая РТК, м <sup>2</sup>				
Условная годовая экономическая эффективность, тыс. руб.				
Срок окупаемости, год				
Время переналадки с одного типа деталей на другой, ч				
Ориентировочная относительная стоимость вспомогательного оборудования (относительная стоимость ПР)				

#### 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ПР

Обобщенным показателем экономической эффективности внедрения роботов является срок их окупаемости, год,

$$D = E / (L - P), \quad (2.1)$$

где  $E$  — затраты по роботизации производства, руб.;  $L$  — годовая экономия фонда зарплаты, руб.;  $P$  — величина годовых эксплуатационных расходов, руб.

С учетом того, насколько оборудование, обслуживаемое роботом, работает быстрее (или медленнее) оборудования, обслуживаемого оператором, формула (2.1) принимает вид

$$D = \frac{E}{L - P \pm q(L + Z)},$$

где  $q$  — коэффициент, определяющий, насколько робот работает быстрее (+) или медленнее (—) оператора, %;  $Z$  — годовые амортизационные отчисления на оборудование, обслуживаемое роботом, руб.

Прибыль от эксплуатации ПР вычисляется по формуле

$$\Pi = k(L - P),$$

где  $k$  — коэффициент прибыли (табл. 2.3).

Кроме прямой прибыли, внедрение ПР позволяет повысить коэффициент сменности с 1,4 до 1,9 при двухсменной работе и до 2,9 при

## 2.8. К выбору оптимального срока эксплуатации ПР

Время эксплуатации робота, год	Коэффициент прибыли с учетом амортизации, %					Время эксплуатации робота, год	Коэффициент прибыли с учетом амортизации, %				
	6	10	15	20	30		6	10	15	20	30
1	0,969	0,950	0,928	0,907	0,870	6	5,051	4,551	4,038	3,620	2,986
2	1,883	1,814	0,735	1,663	1,539	7	5,734	5,088	4,439	3,924	3,169
3	2,746	2,599	2,436	2,293	2,054	8	6,379	5,676	4,788	4,177	3,308
4	3,559	3,313	3,056	2,818	2,450	9	6,987	6,018	5,091	4,388	3,14
5	4,327	3,062	3,577	3,256	2,755	10	7,560	6,421	5,355	4,564	3,497

трехсменной работе оборудования. Примеры экономической эффективности внедрения роботов приведены ниже:

Вид работы	Количество освобождаемых рабочих
Линия сборки автомобильных рам (80 роботов) . . . . .	300*
Обслуживание трех токарных полуавтоматов . . . . .	3**
Обслуживание двух обрабатывающих центров . . . . .	2*
Обслуживание машины для литья под давлением . . . . .	4*
Обслуживание индукционной печи с двумя прессами . . . . .	6**
Погрузка крупных пластмассовых деталей . . . . .	2*
Выбивка отливок из форм, охлаждение в ванне, установка в кассеты . . . . .	2*

\* Работа в три смены.  
\*\* Работа в две смены.

Оценка экономической эффективности использования ПР показывает, что один робот может заменить одного—трех рабочих в одну смену, при этом производительность оборудования можно повысить на 20 % за счет уменьшения его простоев, стабилизации и повышения ритма работы.

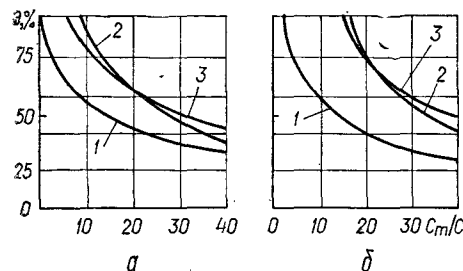


Рис. 2.3. Графики эффективности роботов: 1 — с одним ЗУ; 2 — с двумя ЗУ; 3 — с двумя руками; а —  $n=3$ ; б —  $n=5$

Эффективность использования роботов существенно зависит от соотношения полного времени  $C_m$  манипулирования с деталью в пределах одного цикла и времени  $C$ , затрачиваемого на установку или снятие детали на станок или на транспортер. На рис. 2.3 показаны зависимости эффективности  $\mathcal{E}$  внедрения роботов как функции от  $C_m/C$  при постоянном отношении  $T/C = 0,4$ ,  $n=3$  и  $n=5$ . Здесь  $n$  — число единиц оборудования, обслуживаемого роботом;  $T$  — время на перемещение руки робота с одной позиции на другую (время манипулирования).

Эффективность  $\mathcal{E} = C_p/C_t$ , где  $C_t$  — время одного цикла рабочей операции;  $C_p$  — время, затрачиваемое роботом в пределах одного цикла.

Из графиков рис. 2.3. следует, что при отношении  $C_m/C \approx 10$  степень использования роботов выше 50 %. С ростом  $C_m/C$  эффективность во всех случаях падает, но интенсивность уменьшения величин  $\mathcal{E}$  наибольшая до  $C_m/C \approx 20 \dots 30$ . Наименьшая эффективность у роботов с одним ЗУ. Эффективность роботов с двумя захватными устройствами и с двумя руками почти одинакова.

Экономия фонда заработной платы за счет внедрения роботов определяется количеством высвобождаемых рабочих и величиной их заработной платы. Реальная прибыль зависит от степени использования технических возможностей робота, т. е. от того, насколько рационально будет выбрана его модель для выполнения данной операции. Поскольку стоимость робота увеличивается при росте его технических возможностей, то в ряде случаев внедрение ПР следует рассматривать с позиций решения проблемы нехватки рабочей силы.

## 5. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПР

Виды испытаний ПР регламентируются ГОСТ 16504—81, а порядок разработки и внедрения — ГОСТ 15.001—73 и ОСТ2 НО2-3—76.

На этапах разработки и освоения серийного производства ПР проводят следующие испытания: доводочные, приемо-сдаточные (отделами технического контроля), исследовательские (определение статических, динамических характеристик и показателей надежности, точности и др.), предварительные (заводские), приемочные (ведомственные, межведомственные и государственные), аттестационные, периодические и типовые [14, 31]. По месту проведения различают лабораторные, стендовые, полигонные на опытных робототехнологических комплексах и роботизированных участках и эксплуатационные испытания.

По продолжительности проведения и объему выделяют расширенные, нормальные, ускоренные (формированные и сокращенные) испытания. При наличии эталонного образца проводятся сравнительные испытания.

По ОСТ2 НО2-3—76 испытаниям подлежат опытные ПР, изделия первой промышленной серии и изделия серийного производства. В зависимости от этапа разработки и стадии освоения серийного производства ПР определяют: целесообразность и состав доводочных и аттестационных испытаний опытных образцов (и проводят приемо-сдаточные, исследовательские, предварительные и приемные испытания этих образцов); целесообразность выполнения доводочных, исследовательских и аттестационных испытаний для образцов первой промышленной серии (и проводят приемо-сдаточные испытания для них); целесообразность проведения исследовательских испытаний для образцов серийного производства (и проводят приемо-сдаточные, аттестационные, периодические и типовые испытания).

Каждый из видов испытаний предусматривает определение совокупности основных параметров ПР и регламентирует характер осуще-

ствляемых проверок, необходимую контрольно-измерительную технику и предписывает требования к оформлению результатов испытаний.

Объем и содержание *исследовательских испытаний* определяются задачами, которые ставятся при исследовании ПР. В частности, проведение динамических испытаний рекомендуется проводить прямыми методами измерения параметров (перемещения, скорости и ускорения), исключая использование приемов дифференцирования или интегрирования. Особые требования предъявляются к выбору места расположения контрольной аппаратуры. Датчики рекомендуется располагать на элементах ПР, подверженных наибольшему динамическим воздействиям (например, захватные устройства). В качестве регистрирующей аппаратуры применяются аналоговые регистраторы промышленного типа.

При проведении *приемочных испытаний* их объем должен быть минимальным, но достаточным для объективной оценки технико-экономического уровня ПР и его серийноспособности. Этот вид испытаний проводится при наиболее неблагоприятных сочетаниях определяемых параметров, допускаемых технической документацией (например, при максимальных скоростях, вылете исполнительных устройств и номинальной нагрузке), с использованием простейших измерительных средств.

Программа *приемо-сдаточных* испытаний представляет выборку из программы приемных испытаний и содержит исследование параметров, на которые влияет качество изготовления ПР (например, погрешность позиционирования, грузоподъемность, надежность и др.). Для ряда параметров предусматривается меньший, чем при приемных, объем испытаний (проверка ПР на холостом ходу, а также его элементов, обеспечивающих безопасную и безаварийную работу). Объем приемо-сдаточных испытаний определяется в методиках испытаний для конкретных ПР.

*Предварительные, аттестационные и периодические испытания* проводятся по программе и методике, предусмотренной приемочными испытаниями. Периодические испытания проводятся для сравнения параметров серийно выпущенных в разное время ПР, причем очередность проведения таких испытаний — один раз в два-три года. Аттестационные испытания должны совпадать с ближайшими по сроку периодическими испытаниями.

При проведении *типовых испытаний* оценивается эффективность изменений, внесенных в серийные образцы. Методика проведения таких испытаний соответствует методикам приемочных и исследовательских испытаний, а объем выбирается из соображений необходимости полной проверки функциональной работоспособности измененных составных частей ПР и определения их влияния на работоспособность ПР в целом.

Наиболее важными параметрами ПР, определяющими их функциональную и технологическую универсальность, надежность и безопасность работы, являются номинальная грузоподъемность, погрешность позиционирования и отработки траектории, средние и максимальные скорости, надежность блокирующих и обеспечивающих

безопасную работу устройств, усилие зажима объектов манипулирования.

Под *номинальной грузоподъемностью* понимается суммарная грузоподъемность всех рук или захватных устройств ПР без учета их масс. Номинальная грузоподъемность определяется при варьировании данным параметром, в зависимости от которого исследуют погрешность позиционирования, быстродействие, инерционные и возникающие колебания деформации и другие параметры ПР. При приемочных испытаниях грузоподъемность определяется при переносе объектов номинальной массы в автоматическом режиме с наибольшими допустимыми по паспортным данным скоростями, причем число циклов испытаний по каждой управляемой координате — не менее 10; при приемо-сдаточных испытаниях число циклов — не менее 5.

*Погрешность позиционирования* исследуют для различных точек рабочего пространства в динамическом режиме испытаний в зависимости от массы транспортируемого объекта, значения и скорости перемещений, режимов разгона и торможения. При проведении приемочных и приемо-сдаточных испытаний количество точек рабочего пространства может быть ограничено (в том числе, одной точкой) и должно быть оговорено методикой испытаний конкретного ПР. Аналогично предыдущему параметру, число измерений при приемочных испытаниях должно быть не менее 10, а при приемо-сдаточных — не менее 5. Погрешность позиционирования является характерным параметром для подъемно-транспортных ПР, оснащенных позиционными системами управления.

Для производственных (технологических) ПР, оснащенных контурными системами управления, одним из основных параметров является *погрешность отработки траектории*. Методика проведения испытаний по определению этого параметра основывается на сопоставлении с помощью ЭВМ двух траекторий перемещения рабочих органов ПР, одна из которых записывается в программно-носитель в режиме обучения ПР при использовании всех степеней подвижности, а вторая является фактическим воспроизведением записанной. При приемочных и приемо-сдаточных испытаниях ЗУ зажимается пишущий объект (карандаш или ручка), с помощью которого на листе бумаги вычерчивается кривая, соответствующая запрограммированному в процессе обучения движению. Расхождение запрограммированной и воспроизведенной кривых не должно превышать допустимых паспортными данными значений.

*Средние и максимальные скорости* при динамических испытаниях определяют в зависимости от массы объекта манипулирования, величины и направления перемещения, режимов разгона и торможения. В частности, при определении средних скоростей фиксируется время двойного хода исследуемого элемента ПР при максимальных перемещениях объекта номинальной массы без выдержки времени на переходные режимы в конце хода. Повторяемость этого вида испытаний для каждой степени подвижности — не менее 5. Максимальная скорость перемещения определяется на тех отрезках пере-

мещения, на которых отсутствуют переходные режимы (разгона и торможения) и которые оговорены методикой испытаний конкретных ПР; при этом фиксируется время перемещения объекта на данном отрезке. Как правило, скорости перемещения измеряются при проведении приемочных испытаний; при приемо-сдаточных испытаниях необходимость проведения таких испытаний должна быть оговорена методикой.

При разработке РТК в условиях безлюдной технологии проводятся испытания по проверке блокировок и устройств обеспечения безопасности и безаварийной работы ПР. Наличие таких элементов должно предусматривать: невозможность присутствия человека в рабочей зоне ПР; отключение ПР при превышающих допустимые значения параметрах энергопитания; надежность захвата и удержания объекта манипулирования при самых неблагоприятных сочетаниях режимов работы и параметров ПР (в том числе при внезапном отключении источников энергии); ограничение максимальных перемещений исполнительных органов в пределах рабочей зоны по схеме технологической компоновки РТК. При приемочных и приемо-сдаточных испытаниях блокировка должна проверяться не менее 5 раз; при этом блокировочные устройства должны срабатывать в соответствии с гидравлической, пневматической и электрической схемами.

Усилие зажима ЗУ при приемочных и приемо-сдаточных испытаниях определяется в режимах наибольших скоростей перемещений объектов номинальной массы по координате, совпадающей с осью объекта, когда при внезапном поступлении команды «Стоп», объект не проскальзывает.

### Глава III

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

### 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПР С РАБОЧЕЙ СРЕДОЙ

В зависимости от степени организации рабочей (производственной) среды выделяют робототехнические системы, обслуживающие: совершенно неорганизованную рабочую среду (рис. 3.1, а), полностью организованную (рис. 3.1, в) и частично организованную среду (рис. 3.1, б).

Рис. 3.1, а иллюстрирует полную организацию деталей на плоскости, так как положение каждой из них совершенно определенное. Если же расстояния между деталями разные и случайные, то даже при условии их расположения по рядам имеем случай частично организованной среды. В приведенном на рис. 3.1, б примере частичная организация деталей типа валика заключается в том, что все они распределены на горизонтальной плоскости в один слой, но положение каждой из них совершенно случайное.

Выделяют два способа организации среды. Первый из них состоит в том, что детали упорядоченно и одновременно размещены на неко-

тором участке площади или пространства, второй — все детали размещаются поочередно (последовательно) в одном месте.

С точки зрения простоты конструкции робота и программы его работы наиболее целесообразно заранее подготавливать (полностью или частично) обслуживаемые им объекты — обслуживаемую среду.

Робот может взаимодействовать также с неполностью организованной (упорядоченной) средой. В этом случае он захватывает неполностью сориентированные детали, окончательно ориентируя их непосредственно в самом ЗУ. Однако для успешного взаимодействия с неорганизованной или частично организованной средой ПР должен оснащаться разветвленной сетью сенсорных и тактильных устройств, обеспечивающих его информацией о принадлежности захватываемых

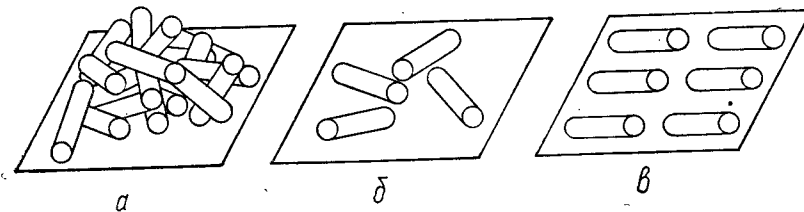


Рис. 3.1. Видоизменения рабочей среды:  
а — полностью неорганизованная; б — частично организованная; в — полностью организованная

объектов к определенному классу, занимаемом ими в пространстве и относительно друг к другу положению, качестве изготовления и т. д. Кроме того, для обработки этой информации и выработки решения об управляющих воздействиях на манипуляционную систему ПР требуется более совершенная система управления вплоть до использования ЭВМ, что значительно удорожает разработку и изготовление робота и увеличивает затраты на обслуживание РТС в производственных условиях.

Для снижения информационной и вычислительной нагрузки на ПР необходима предварительная организация рабочей среды.

### 2. УСТРОЙСТВА ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Для того чтобы робот (особенно робот I поколения) мог эффективно работать в производственных условиях, необходимо оснастить рабочие места рядом технологических устройств и приспособлений. Кроме самого ПР, система комплексной автоматизации, как правило, должна включать сопутствующие средства, обслуживающие робота. Среди них основными являются устройства организации рабочей среды, которые придают деталям (объектам), занимающим первоначально самые разнообразные положения (т. е. находящимся в навале), одно определенное расположение.

Указанные средства не только переводят детали в требуемые положения, но и обеспечивают их координирование и фиксацию на определенных наперед заданных позициях.

К устройствам организации рабочей среды относятся транспортные, загрузочные, ориентирующие устройства и накопители. Часто функции ориентирования совмещают загрузочные устройства.

Прежде чем поступить на рабочую позицию, где выполняется непосредственно технологическая операция, деталь проходит ряд этапов, подготавливающих ее к установке на эту позицию. Одним из основных является этап перемещения деталей с одного места на другое. На этом этапе детали, во-первых, перемещаются в постоянном ориентированном положении (с помощью транспортных органов) и, во-вторых, деталям придается требуемое для осуществления технологической операции положение, поскольку первоначально они располагаются навальом в таре (данная задача осуществляется в загрузочно-ориентирующих органах).

Аналогичную функцию выполняют также роботы II и III поколений, но в отличие от загрузочного устройства — принципиально иначе: если робот сам опознает положение некоторой случайным образом расположенной детали и приспосабливается к данному положению, соответствующим образом ориентируя захватное устройство, то загрузочное устройство заставляет деталь приспособиться к расположению ЗУ. В последнем случае деталь как бы «опознает» положение захвата и подстраивается под него.

Часто используется промежуточное решение, когда загрузочное устройство комплектуется с роботом. Здесь оно переводит деталь с помощью ориентирующих устройств из навала в одно или несколько вполне определенных различных положений. Робот переносит деталь из загрузочного устройства на позицию обработки (или сборки) и выполняет соответствующие, наперед запрограммированные, ее повороты. Обычно подобное сочетание является наиболее рациональным, так как при этом существенно упрощается конструкция всей установки, система управления и соответственно повышается надежность ее работы.

Как следует из вышесказанного, транспортные устройства обеспечивают, в основном, перемещение объектов (деталей, заготовок, сборочных единиц и т. п.), а загрузочные, ориентирующие устройства и роботы — их подачу (захват деталей, ориентирование, перенос и размещение в накопителях или на технологической позиции).

### 3. ТРАНСПОРТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Транспортные устройства (часто их называют транспортерами) весьма разнообразны и подразделяются в зависимости от *такта работы* на синхронные и несинхронные. Из них первые характеризуются постоянством такта, у вторых такт работы переменный. Основная особенность несинхронных транспортных устройств заключается в том, что базирующие приспособления (станции) связаны с транспортером не жестко и могут отсоединяться от него, останавливаясь в нужном положении и на нужное время. При таком выполнении на транспортере должен оставаться определенный свободный промежуток, где могли бы накапливаться отсоединенные от транспортера, но остающиеся на нем станции.

В настоящее время несинхронные транспортеры находят все большее распространение.

В зависимости от *характера движения* транспортеры делятся на непрерывно и прерывно движущиеся. Непрерывные транспортеры подразделяются на два вида. Отличительная особенность транспортеров первого вида состоит в том, что станции (или перемещаемые детали) останавливаются на время выполнения рабочей операции, в то время, как транспортер движется. При работе транспортера второго вида станции не останавливаются, рабочие операции над объектами осуществляются в процессе движения — на ходу.

В зависимости от *траектории движения* транспортеры выполняются прямолинейными и криволинейными (в частности, круговыми). Криволинейный транспортер обычно не только служит средством перемещения объектов, но и базирующим элементом, на котором размещаются также исполнительные устройства и механизмы.

Транспортеры, движущиеся по криволинейным траекториям, чаще всего выполняются замкнутыми. Их тяговые органы представляют собой непрерывные гибкие элементы. Прямолинейные транспортеры могут быть как замкнутыми, так и незамкнутыми. Незамкнутые транспортеры оснащены устройствами возвратно-поступательного движения, перемещающими объекты с одной позиции на другую (например, штанговые, грейферные транспортеры). Во многих технологических операциях, в том числе сборочных, применение грейферных транспортеров позволяет фиксировать объекты с высокой точностью при относительно простой и надежной его конструкции.

В зависимости от *вида фиксации объекта* транспортеры подразделяются на транспортеры с фиксацией и без фиксации. В *транспортерах с фиксацией* объекты производства помещаются в захваты; в *транспортерах без фиксации* они устанавливаются на транспортере, а связь между последними ними обеспечивается только силами трения (в некоторых случаях ограничителями, например, планками). В транспортерах с фиксацией на перемещаемый объект накладываются двухсторонние связи, в транспортерах без фиксации эти связи односторонние.

Одним из примеров транспортеров без фиксации деталей являются дисковые транспортеры, особенность которых состоит в том, что в них отсутствует жесткая связь между деталью и транспортным органом, а движение детали обеспечивается только силами трения. Такая конструкция исключает какие бы то ни было остановки и поломки транспортера, и поэтому отпадает необходимость вводить в него предохранительные органы. Для придания нужного направления движения подобные транспортеры снабжаются прямолинейными или криволинейными отклонителями-планками (одним или несколькими).

Дисковый транспортер (рис. 3.2, а) содержит круглый диск 1, вращающийся непрерывно, например, по часовой стрелке. Над диском и соосно с последним размещен ротор 2, сидящий на вале 3, который свободно проходит в отверстие ступицы диска. Вал, несущий ротор, вращается против часовой стрелки. Детали 4, поступившие на диск, подводятся последними к планке 5 и перемещаются вдоль нее, заходя

при этом в гнезда ротора 2. Ротор, вращаясь навстречу диску, отделяет захваченную деталь от остальных и перемещает ее к позиции выгрузки (вращение ротора может быть как непрерывным, так и прерывистым); при этом над деталью выполняется необходимая технологическая операция (например, установка с помощью робота другой детали и соединение ее с данной деталью).

Деталь 4, совершив полный оборот вокруг оси ротора, подходит к планке 5 с обратной стороны и выталкивается ею из гнезда. Диск подхватывает деталь и перемещает к планке 6, которой она отводится с диска и передается дальше. На рис. 3.2, б показан аналогичный транспортер, отличающийся тем, что прямолинейный отклонитель заменен криволинейным отклонителем 4.

Детали 2, перемещаясь с центра диска 1 на периферию, попадают уже в ориентированном положении в отводящий канал 3.

Существует ряд модификаций подобных транспортеров, в том числе и таких, которые имеют только несущий диск и две планки, направляющие движение деталей. В таких транспортерах можно осуществлять вторичное ориентирование сложных по конфигурации перемещаемых деталей, ориентируя их на ходу.

Рис. 3.2. Фрикционные дисковые транспортеры с прямолинейным (а) и криволинейным (б) отклонителями

На дисковом транспортере можно ориентировать, например, плоские и объемные детали. При этом можно так подобрать расположение планки, что если деталь движется, опираясь на большую грань, она не меняет своего положения; если же деталь при движении опирается на меньшую грань, она разворачивается на  $90^\circ$ , и тогда опорной становится большая грань.

#### 4. ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

Загрузочные устройства подразделяют на бункерные и магазинные: первые обеспечивают выдачу полностью или частично ориентированных деталей (как правило, поштучно) на исходную позицию, с которой они забираются роботом; вторые часто загружаются вручную, причем детали в магазине обычно располагаются впритык — одна к другой. Для этого применяются шахтные магазины или лотки как открытого, так и закрытого типов.

Если магазины предназначены для автоматической загрузки, они чаще всего выполняются в виде плоских кассет с гнездами-отверстиями, в которых размещаются в ориентированном положении загружаемые детали.

Бункерные загрузочные устройства достаточно хорошо отработаны, просты, производительны, надежны и эффективны [77]. Основной их недостаток — узкая специализация, т. е. каждая конструкция может

быть, как правило, использована для организованной выдачи деталей одного типоразмера. Если возникает необходимость ориентировать другие детали, приходится заменять все загрузочное устройство.

Исключение составляют вибрационные бункеры, которые отличаются большой степенью универсальности. При переходе на подачу других деталей в них меняются только ориентирующие органы. В вибробункере, с одной стороны разграничены, а с другой — объединены такие его органы, как емкость для навала деталей (чаша), транспортер (винтовой лоток), захват (тот же лоток), ориентирующий орган. Таким образом, построение вибробункера основано на модульном принципе, где каждый из отмеченных органов — своеобразный его модуль.

Так как движущее усилие на захватываемую и перемещаемую деталь передается не подвижными механическими органами, а посредством сил трения, т. е. связи между бункером и деталью — неудерживающие, следовательно, заедания, заклинивания и связанные с ними поломки и задержки в правильно спроектированном вибробункере исключены.

Таким образом, любое загрузочное устройство будет универсальным и эффективным, если в нем удачно сочетаются его отдельные органы. В первую очередь это относится к возбуждению такого перемещающего детали усилия, чтобы жесткие двухсторонние связи, налагаемые на них, были исключены. Это может быть обеспечено при использовании воздействия на деталь любого поля (электромагнитного, пневматического, гидравлического и т. п.), за исключением гравитационного. Разрознить детали можно только противодействием силам тяжести, т. е. используя поля с эффектом противодействия силам тяжести.

Подобная задача может быть выполнена на базе линейных асинхронных двигателей. Загрузочные устройства с такими двигателями позволяют легко регулировать скорость и направление движения, перемещать детали с наперед заданными интервалами одна от другой. К недостаткам следует отнести то, что их нельзя использовать при подаче нетокопроводящих деталей (например, деталей из пластмассы, дерева и т. п.).

Возможна загрузка деталей таким же образом, но с помощью пневматических и гидравлических полей. Последнее из них предпочтительнее, так как обладает большими энергетическими возможностями. Сейчас уже известны для загрузки гидроустановки, работающие как на гидродинамическом, так и на гидростатическом принципах [48]. Их недостаток состоит в том, что детали вводятся в контакт с жидкостью (вода, масло), запас которой нужно периодически пополнять. С этой точки зрения устройства на основе пневматических полей предпочтительнее, но они используются, как правило, для загрузки деталей приборов (контакты, плавкие предохранители и т. п.), т. е. деталей сравнительно малой массы.

В некоторых случаях загрузка может быть осуществлена без помощи бункера. Такие загрузочные устройства называются *магазинными*. Они состоят из магазина, лотков и питательного механизма. Магазинные загрузочные устройства отличаются от бункерных тем, что детали в них располагаются не навалом, а ориентированными в опре-

деленном положении для подачи к рабочему механизму технологической машины. В связи с отсутствием у таких устройств бункера магазин делается обычно большим, так как в этом случае он должен содержать запас деталей на значительный период работы технологической машины.

В связи с тем, что в функцию обслуживающего рабочего входит загрузка магазина деталями в строго ориентированном положении, магазинные устройства не являются полностью автоматическими. Они применяются в следующих случаях: при достаточно сложной форме деталей, когда их автоматическое ориентирование в бункерных загрузочных устройствах не представляется возможным; при обслуживании деталей значительных масс и размеров, при которых бункер получается чрезмерно громоздким; когда недопустимо интенсивное ворошение деталей в бункере из-за возможной их порчи; когда машинное время обработки деталей на технологическом оборудовании довольно значительно, и небольшое количество заготовок может обеспечить оборудование работой на длительный промежуток времени.

Магазины бывают лотковые, ящичные и револьверные [52, 77, 82].

### 5. ОРИЕНТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Ориентирование разделяется на первичное и вторичное. При *первичном ориентировании* детали переводятся из любого возможного в устойчивые положения, которых обычно может быть несколько.

Данный процесс осуществляется захватными органами загрузочного устройства и на так называемых определяющих

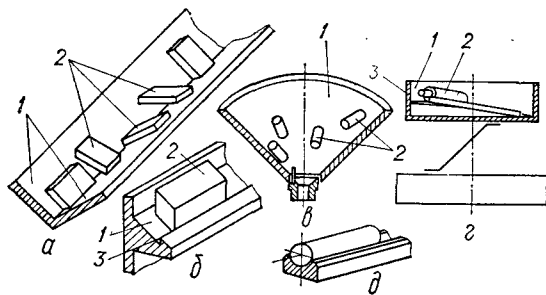


Рис. 3.3. Формы определяющих поверхностей:

а — две плоскости; б — наклонная плоскость с уступом; в — усеченный конус; г, д — лоток вибробункера и с полукруглой выемкой

поверхностях, представляющих собой элементы емкости (бункера загрузочного устройства. Так, для детали 2 типа прямоугольного бруска (рис. 3.3, а) определяющими поверхностями служат две плоскости 1, пересекающиеся под определенным углом друг с другом. Если одна из них располагается под углом к горизонтали, большим угла трения, то детали занимают на этих плоскостях в процессе перемещения только три устойчивых положения, которые называются различными. Обычно одна из определяющих поверхностей (рис. 3.3, б) является опорной (1), а другая (3) направляющей. Устойчивые различные положения детали 2 определяются взаимным расположением этих поверхностей.

Для цилиндрических деталей типа валика 2 (рис. 3.3, в) определяющая поверхность 1 может иметь вид усеченного конуса. Одновременно

она является опорной и направляющей. Для подобных деталей 2 (рис. 3.3, г) опорной поверхностью служит лоток 1 вибробункера, а направляющей — его боковая поверхность 3. Лоток с полукруглой выемкой (рис. 3.3, д) обладает свойствами опорной и направляющей поверхностей.

При *вторичном ориентировании* все детали, прошедшие первичное ориентирование, переводятся в заданное положение. В ряде случаев этапы первичного и вторичного ориентирования совпадают. В основном это происходит тогда, когда число устойчивых различных\* положений детали невелико.

Чем больше различных положений занимает деталь после первичного ориентирования и чем меньшей будет разница между ними, тем сложнее процесс вторичного ориентирования, которое практически всегда осуществить труднее, чем первичное.

Часто в результате ориентирования выделяются детали, произвольно занявшие правильное положение, и отсеиваются детали, занявшие неправильные положения. Такое ориентирование является пассивным. В противоположность ему ориентирование, при котором детали всех положений, прошедших первичное ориентирование, переводятся в заданное, называется активным. В ряде случаев ориентирование проводится по комбинированной схеме как активно-пассивное.

Процесс ориентирования можно разделить на три стадии, от которых в значительной мере зависят способ и средства его проведения. *Первая стадия* — захват детали из навала и транспортирование ее к месту выдачи; *вторая* — контроль занятого положения (который в ряде случаев осуществляется в процессе транспортирования, т. е. первая и вторая стадии объединяются во времени); *третья стадия* — изменение положения детали соответственно результатам контроля. Эта стадия также может быть объединена с двумя первыми стадиями.

Если рассматривать ориентирование как специфическую контрольную операцию, то при пассивном ориентировании отбраковываются «негодные» и выделяются «годные» (по занимаемому положению) детали для проведения последующей технологической операции. Активному ориентированию соответствует операция исправления «брака», т. е. неправильно расположенные детали, положение которых изменяется, соответствуют «браку исправимому», а отсеиваемые детали — «браку неисправимому».

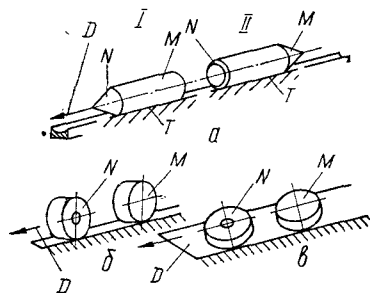
Величина подобного «брака» определяет эффективность системы ориентирования. Эффективность ориентирования можно оценить количественно как отношение числа деталей, занимающих или принявших на выходе из устройства правильное положение, ко всем деталям, проходящим ориентирование. Если в ориентирующее устройство попадают, например, 100 деталей, а выходят из него ориентированными 50, эффективность ориентирования  $\eta = 0,5$ .

В процессе ориентирования, с одной стороны, выступают детали как объекты этого процесса, а с другой, — ориентирующее устройство

\* Различными называются различные положения, которые деталь может занимать на плоскости. Из всех различных положений приемлемым является одно, в котором деталь должна быть подана в технологическую машину.

как средство достижения поставленной цели. В общем случае ориентирующее устройство состоит из следующих механизмов: перемещения и захвата деталей; контроля; выделения данного положения детали или ее разворота — исполнительного механизма. В состав ориентирующего устройства входят также определяющие поверхности, являющиеся несущими и направляющими органами для детали.

Наиболее простым является ориентирующее устройство, у которого механизмы контроля и исполнительный реагируют только на два состояния детали — заданное (правильное) и все отличающиеся от заданного (неправильные). Этим объясняется широкое распространение пассивного ориентирования с отсевом всех деталей, занявших произвольные положения, за исключением одного, заданного.



Элементы ориентирующего устройства взаимодействуют с соответствующими элементами детали. В зависимости от фазы (этапа) этого взаимодействия поверхности детали подразделяются на опорные (базовые), ориентирования и сопряженные. Из них

Рис. 3.4. Ориентирующая и сопряженные поверхности стержневой (а) и дискообразной (б) деталей

первые представляют собой поверхности, по которым осуществляется контакт с определяющими поверхностями ориентирующего устройства; вторые — поверхности, с которыми взаимодействуют контрольные органы, определяя занятое деталью положение в данном случае; третьи становятся поверхностями ориентирования, когда деталь займет другое различное положение и начнет взаимодействовать с контрольным органом. На рис. 3.4, а изображена осесимметричная деталь, по концам которой проводится ориентирование. Двигаясь в положении I по опорной поверхности Т в направлении D, она начинает на позиции ориентирования взаимодействовать с ориентирующим устройством по поверхности N, которая в данном случае является поверхностью ориентирования.

Торцевая поверхность М является по отношению к поверхности N сопряженной. Если же деталь движется в положении II, поверхности ориентирования и сопряжения меняются местами. На рис. 3.4, б и в показаны аналогичные поверхности деталей типа дисков, имеющих с одного торца выемку по оси.

Очевидно, чем больше отличаются друг от друга ориентирующая и сопряженная поверхности, тем проще и легче выделить возможные различные положения деталей, и наоборот. С позиций ориентирования сложность форм деталей определяется главным образом тем, насколько резко выражена разница между базовой поверхностью и поверхностью ориентирования, с одной стороны, и между базовой и сопряженной поверхностями, с другой.

В каждом отдельном случае ориентирующее устройство должно обладать соответствующей чувствительностью, обеспечивающей надежное ориентирование. При значительной асимметрии детали требуется высокая чувствительность устройства, что соответственно усложняет сам процесс. Поэтому часто простые с геометрической точки зрения детали вызывают затруднения при их ориентировании. Для облегчения ориентирования в ряде случаев специально в деталь вводят характерные элементы, так называемые «ключи ориентации» или «признаки ориентации» [19, 39], которые, с одной стороны, уменьшают количество различных положений, а с другой, — дают возможность провести ориентирование более просто. В некоторых случаях с той же целью уменьшают асимметрию, т. е. изменяют форму и размеры детали.

Все ориентирующие устройства разделяют по характеру их взаимодействия с деталями на две группы: статические и кинематические.

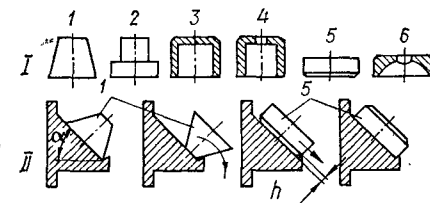


Рис. 3.5. Ориентирование детали на скошенном лотке

К первой из них относятся устройства, рабочие органы которых не меняют своего положения в процессе ориентирования и не реагируют на различие в положениях деталей. Детали, наоборот, реагируют на положение рабочих органов, приспособляясь к ним. Примером статических устройств являются щелевые ориентаторы, выполненные в вибролотках. В статических устройствах нет движущихся органов, что определяет простоту их конструкции.

Более развиты по своей структуре и конструкции кинематические ориентирующие устройства, которые могут изменять положения своих элементов в зависимости от положения детали. Такие устройства представляют собой механизмы, по-разному реагирующие на различные положения детали и по-разному воздействующие на нее.

Статические ориентирующие устройства относятся к самым простым и часто представляют собой скосы на лотках, щели или пластины, играющие роль кулачков. Все такие устройства являются калибрами размеров или формы, которые могут выделять два состояния: правильное и неправильное (последнее включает в себя все различные положения, кроме правильного).

На рис. 3.5 в I ряду показана группа ориентируемых деталей 1...6, а во II — средства ориентирования двух деталей 1 и 5 из этой группы. Для ориентирования отмеченных деталей лоток вибробункера (показан в поперечном сечении) наклонен под углом  $\alpha$ . Этот угол выбирается таким образом, чтобы центр тяжести детали I в одном положении находился над лотком, а в другом — за его правой гранью.

В случае ориентирования дискообразной детали 5 с односторонней фаской при движении фаской вниз деталь не может удержаться на лотке и соскальзывает в емкость бункера, при движении с опорой на торец

без фаски она остается на лотке. Высота выступа  $h$  лотка должна быть несколько меньше размера фаски.

Щелевые (трафаретные) устройства ориентирования показаны на рис. 3.6. На рис. 3.6, а показаны примеры ориентируемых деталей 1...4. Устройство, изображенное на рис. 3.6, б, предназначено для ориентирования детали 3 из верхнего ряда. Оно состоит из двух лотков — верхнего 1 с трафаретом 3 по форме одного из различных положений детали 3 (всего их может быть шесть) и нижнего 2, на который поступают, проваливаясь в трафарет 3, только детали одного положения, т. е. того, которое соответствует трафарету. Все остальные детали соскальзывают, пройдя над трафаретом, в емкость вибробункера.

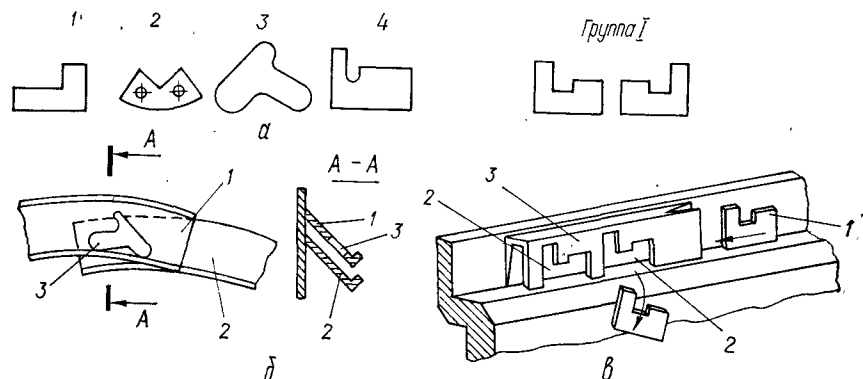


Рис. 3.6. Ориентирование деталей в щели:

а — примеры ориентируемых деталей; б — ориентирование детали в щели на наклонном лотке; в — ориентирование детали в щели на горизонтальном лотке

Устройство, изображенное на рис. 3.6, в, ориентирует детали 4 верхнего ряда. Данные детали также занимают на вибрлотке шесть различных положений, образуя три группы (по два положения в каждой группе). Все группы (отличаются по высоте деталей), кроме группы 1 (показана на рисунке), отсеиваются перед трафаретом с помощью клина-отражателя (дефлектора). К трафарету подходят только детали с положениями 1 группы. Детали 4 в этом положении (слева в группе 1, рис. 3.6, в) проваливаются в окно трафарета и попадают в чашу бункера; деталь справа проходит над окнами. Следовательно, за трафаретом остаются только детали этого положения. Эффективность такого устройства равна 1/6, т. е. относительно невысока, но при значительной общей производительности бункера вполне достаточна для обслуживания любой автоматической машины. В данном трафарете выполнены два аналогичных окна, чтобы повысить надежность работы ориентирующего устройства.

На рис. 3.7 показано ориентирование деталей с помощью отражателей. Плоская деталь типа прямоугольного бруска (рис. 3.7, а), у которой сторона  $a$  больше, чем сторона  $b$ , ориентируется на скошенном вибрлотке 2 клином 1, размещенным так, чтобы пропускать де-

тали одного положения (когда опорой служит сторона  $a$ ) и не пропускать детали другого положения (когда опорной стороной служит сторона  $b$ ). Для этого клин размещается на такой высоте  $h$ , чтобы  $a > h > b$ .

На рис. 3.7, б показано ориентирование более сложной детали, занимающей на лотке четыре различных положения. Устройство включает клин 1, гребешок 2 и скос 3. Детали трех различных положений (в том числе и положения, показанного на рис. 3.7, б справа) не проходят через ориентирующее устройство, соскальзывая в чашу бункера. Устройство пропускает детали только такого положения, когда паз в детали надвигается на гребешок, удерживающий ее на лотке. Распространены комбинированные статические устройства. В них клинья разделяют детали, принадлежащие к разным группам, а щели — детали, входящие в одну группу.

Кинематические ориентирующие устройства не только вызывают ответные реакции деталей, но и сами по-

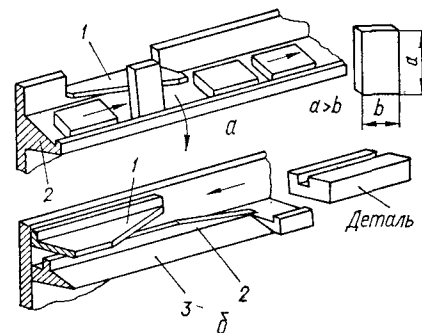


Рис. 3.7. Ориентирование с помощью отражателей деталей типов прямоугольного бруска (а) и бруска с пазом (б)

разному реагируют на различные положения последних. Таким образом, они более разнообразны в своих проявлениях, чем статические ориентирующие устройства. Их конструктивная особенность — наличие подвижных элементов, взаимодействующих с поверхностями ориентирования и сопряженной.

Одно из таких устройств (рис. 3.8) включает вибрационный лоток 1 с установленной на оси фигурной заслонкой 2, которая закрывает такую же по форме щель и поджимается к дну лотка пружиной 3. Деталь — типа ступенчатого валика, у которой центр тяжести практически находится по середине ее длины. Поэтому использовать щель для ориентирования нежелательно из-за ненадежной фиксации различных положений детали.

Детали (например, метчики) двигаются по лотку слева направо в двух различных положениях — более тонкая часть спереди либо сзади. При движении тонкой частью сзади деталь, выходя на щель, полностью вписывается в ее профиль и ложится всей своей массой на заслонку. Под действием момента силы тяжести детали заслонка поворачивается на оси в направлении против часовой стрелки. Щель при этом открывается, и деталь по заслонке соскальзывает вниз, где может пройти переориентирование.

При движении более тонкой частью спереди деталь опирается большей частью своей массы на узкие края щели, что удерживает ее от выпадения в щель. Момент, стремящийся повернуть заслонку, оказывается недостаточным, так как деталь действует на нее не всей массой,

а лишь ее половиной. Поскольку пружина 3 подобрана так, что заслонка при этом повернуться не может, деталь остается на лотке.

Деталь 1 (рис. 3.9) такова, что ее размеры  $l_2$  и  $l_1$  разнятся на 0,3 мм. Поэтому геометрическая асимметрия ее невелика, и ориентирование вызывает значительные трудности. Эффективное устройство кинематического ориентирования для такого рода деталей включает в себя расположенный над вибрлотком 4 кронштейн, к которому на пружине 2 прикреплен молоточек 3. При вибрациях чаши бункера молоточек колеблется с той же частотой, свободно пропуская деталь, если она движется более коротким концом (размером  $l_1$ ) вверх. При движении более длинным концом вверх молоточек ударяет о верхний край

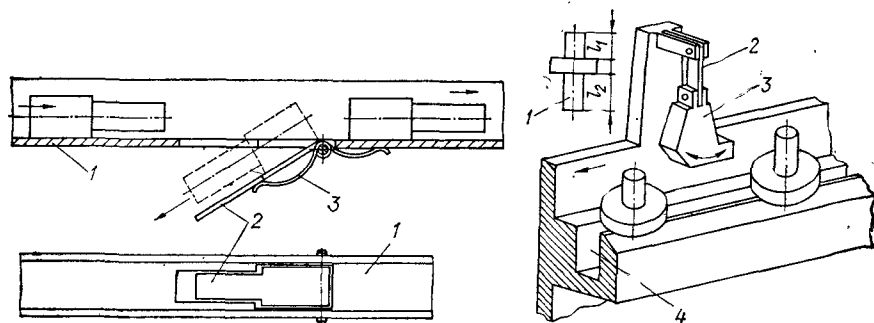


Рис. 3.8. Кинематическое ориентирующее устройство

Рис. 3.9. Ориентирующий молоточек ( $l_2 - l_1 = 0,3$  мм)

детали, одним толчком выбивая и выталкивая ее с лотка. Устройство очень эффективно и может быть применено для ориентирования не только цилиндрических, но также плоских и призматических деталей.

Среди кинематических ориентирующих устройств выделяются такие, в которых ориентирование производится непрерывно в процессе движения. Основой их служат различного вида роторы с гнездами для ориентируемых деталей. Такие устройства характеризуются высокой производительностью, возможностью проводить активное ориентирование, а также тем, что позволяют ориентировать детали, обладающие внутренней асимметрией.

На рис. 3.10, а показано роторное устройство для ориентирования деталей, изображенных на рис. 3.10, б. Неориентированные детали 4 (рис. 3.10, а) подаются по лотку 12 и по одной направляются в гнезда 3 непрерывно вращающегося ротора 5. Напротив каждого гнезда в кольце 2, жестко скрепленном с ротором, установлены подвижно подпружиненные штыри 7. В штырях размещен контрольно-опознающий механизм, включающий две ползушки 10, соединенные двумя плоскими пружинами 9. На одной из них установлен винт 11, на другой — контакт 8, образующие вместе контактную пару.

Когда деталь 4 уже находится в гнезде, штырь 7 подается к центру ротора, входя в отверстие ориентируемой детали. Подача осуществля-

ется от неподвижного кулачка 1. При этом ползушки 10 сходятся, деформируя пружины 9 и размыкая контактную пару. Если деталь в гнезде расположена так, как показано на рис. 3.10, а, то, попадая в выточку детали, ползушки расходятся, замыкая контактную пару 8—11. Тем самым в систему управления подается сигнал, открывает заслонку 6, в результате чего деталь попадает в накопитель подобных положений (выточкой влево). Если же деталь в гнезде размещена выточкой вправо, контакты не замкнутся, так как штырь до выточки не дойдет. При этом команда на заслонку не поступит и она откроется в другом месте, где собираются детали, расположенные выточкой вправо.

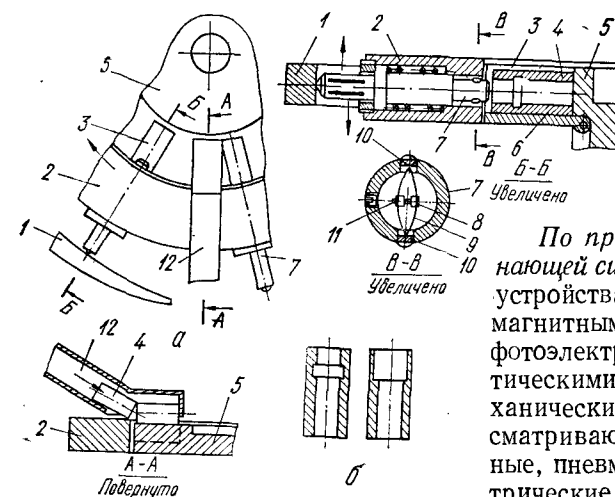


Рис. 3.10. Роторное ориентирующее устройство:  
а — схема; б — ориентируемые детали

По принципу действия опознающей системы ориентирующие устройства могут быть электромагнитными, пневматическими, фотоэлектрическими, электростатическими, гидравлическими, механическими и т. п. Ниже рассматриваются электромагнитные, пневматические и фотоэлектрические ориентирующие устройства, нашедшие наибольшее

распространение в машино- и приборостроении.

Электромагнитные ориентирующие устройства основаны на ориентировании деталей в электромагнитном переменном поле. Преимущества ориентирования деталей в электромагнитном поле состоят в следующем: процесс является бесконтактным; данное различное положение детали (контроль) опознается одновременно с силовым воздействием на нее, т. е. функции контрольного и приводного органов объединены в одном; электромагнитное поле позволяет опознавать расположение элементов, размещенных внутри детали, т. е. имеется возможность «узнавать» различные положения, определяемые внутренней асимметрией детали. Электромагнитные ориентирующие устройства имеют хорошие эксплуатационные свойства, дешевы, просты по конструкции и обеспечивают высокую производительность. Система подобных средств разработана в институте физики АН Латвийской ССР и называется системой электромагнитного группового ориентирования (ЭМА О) [28].

Для ориентирования деталей используются следующие свойства электромагнитного поля: возникновение сил взаимодействия между

полем и ферромагнитной деталью; возникновение ориентирующих моментов при внесении в поле детали из-за изменения его энергии; возникновение сил взаимодействия магнитного поля с вихревыми токами, наведенными в ориентируемой неферромагнитной детали; изменение индуктивности катушек при изменении конфигурации ферромагнитных деталей, внесенных в катушку, или их относительного расположения.

Одно из таких устройств [28], предназначенное для установки в заданное положение плоских немагнитных токопроводящих деталей (рис. 3.11), представляет собой многосекционную плату 1, состоящую из катушек 3 и установленную в переменном магнитном поле электромагнита 4. Каждая из катушек снабжена автономной обмоткой, в которой одни выводы соединены и заземлены, а другие посредством ключей-контактов связаны с контактами 6 пульта управления 5. Число и расположение контактов соответствует числу и расположению катушек на многосекционной плате.

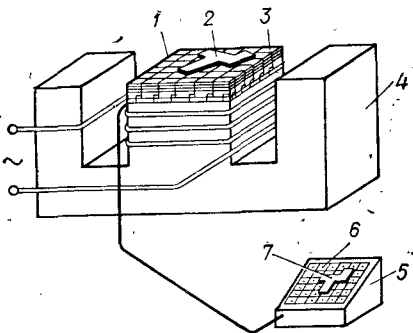


Рис. 3.11. Устройство разворота детали и заданное положение

На пульте управления установлен шаблон 7, по форме повторяющий деталь 2 и предназначенный для замыкания необходимых обмоток платы 1 в нужном сочетании. Неориентированная деталь 2 попадает на плату, размещаясь на ней случайным образом. Для захвата она должна повернуться в требуемое положение, повторяющее положение шаблона. Шаблон замыкает через контакты обмотки платы, и в них возникают токи. Кроме того, ток наводится в контуре детали 2. Вследствие взаимодействия между токами отдельных катушек и частями контура тока, индуцированного в детали, на последнюю действует момент сил, поворачивающий ее в требуемое положение. При совпадении положения детали с заданным момент сил, действующий на деталь, становится равным нулю. Деталь фиксируется в определенном положении.

Для усиления силового воздействия на ориентируемую деталь устройство может быть выполнено в виде С-образного магнита, на обоих полюсных наконечниках которого устанавливаются многосекционные платы с катушками. В этом случае шаблон, располагаемый на пульте управления, одновременно замыкает как верхние, так и нижние обмотки катушек.

Развернувшаяся в заданное положение деталь забирается ЗУ робота и устанавливается на рабочей позиции.

Принцип действия пневматических ориентирующих устройств основан на свойствах воздушных струй: присасывающее и отталкивающее их действия, воздушная подушка, явление эжекции и т. д. Преимущество пневматических устройств состоит в том, что

струя является одновременно транспортным, контрольным и исполнительным органом. При этом действием струи легко управлять, изменяя ее направление и силу, прикладывая ее к детали. Особенно расширилась сфера применения пневматических устройств после внедрения в практику средств УСЭППА и пневмоники, на базе которых можно строить высокоэффективные и простые системы управления ориентирующим устройством, и, в первую очередь, устройства опознавания и контроля.

Устройство такого типа [70] предназначено для ориентирования разнообразных деталей 1...4 с большой асимметрией (рис. 3.12, а).

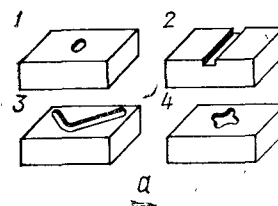


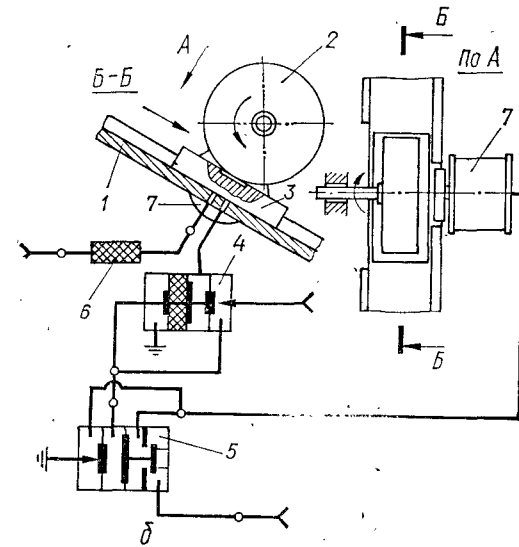
Рис. 3.12. Пневматическое релейное устройство:  
а — ориентируемые детали; б — схема устройства

Преимущество данного устройства в том, что ориентирование происходит в процессе движения, т. е. является непрерывным. Деталь 3 (рис. 3.12, б) движется по лотку 1 в направлении стрелки и подходит под прижимной ролик 2, вращающийся против часовой стрелки. Воздух из питающей магистрали через фильтр 6 постоянно поступает в левое сопло, выполненное в лотке.

Если детали нет или она идет так, как показано на рисунке (элементом, вносящим асимметрию, вверх), никакого сигнала в систему управления не поступает. В противном случае воздух через выемку в детали и правое сопло попадает в камеру управления стандартным реле 4 (например, типа Р-ЗН), входящим в систему УСЭППА. Этот сигнал усиливается усилителем 5 (например, типа ПГ-У), и сжатый воздух через последний попадает в пневмопривод 7, сталкивающий деталь данного положения с лотка.

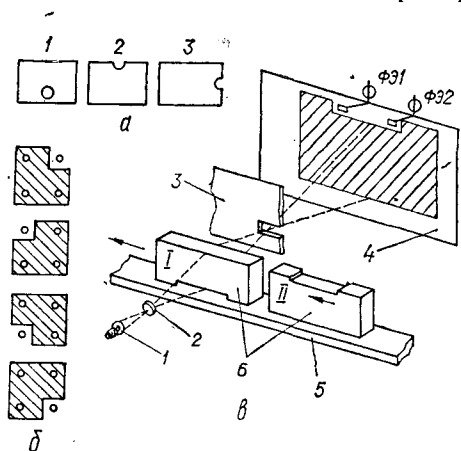
Если детали нет или она идет так, как показано на рисунке (элементом, вносящим асимметрию, вверх), никакого сигнала в систему управления не поступает. В противном случае воздух через выемку в детали и правое сопло попадает в камеру управления стандартным реле 4 (например, типа Р-ЗН), входящим в систему УСЭППА. Этот сигнал усиливается усилителем 5 (например, типа ПГ-У), и сжатый воздух через последний попадает в пневмопривод 7, сталкивающий деталь данного положения с лотка.

Из показанных на рис. 3.12, а деталей деталь 3 наиболее сложная, так как может занять на лотке четыре различных положения (детали 1, 2 и 4 имеют по два различных положения). Чтобы ориентировать ее указанным методом, на лотке должны быть размещены два устройства, аналогичных описанному, но с разным расположением сопел в лотке. Подобная схема позволяет ориентировать также детали, занимающие по шесть—восемь и более различных положений.



Фотоэлектрические ориентирующие устройства, так же как пневматические, электромагнитные и электростатические, относятся к группе бесконтактных. Их особенность — высокая чувствительность, что позволяет ориентировать детали с очень большой асимметрией; для таких устройств характерно значительное быстродействие.

Детали 1...3, изображенные на рис. 3.13, а могут занимать вдоль своей большей стороны по два различных положения, деталь на рис. 3.13, б — четыре различных положения в зависимости от того, как расположен вырез. Как видно из рис. 3.13, б, для каждого различного положения один из четырех фотоэлементов, расположенных по



углам детали, остается неприкрытым. Следовательно, при освещении такой «маски» и ее затемнении проходящими деталями при каждом положении выдается характерный именно для него сигнал. Преобразованный в системе управления, этот сигнал заставит так сработать исполнительный механизм, чтобы деталь

Рис. 3.13 Фотоэлектрическое устройство:

а — ориентируемые детали; б — расположение опознающих масок; в — схема

в каждом из положений была развернута (переориентирована) в требуемое положение.

Другая схема ориентирования показана на рис. 3.13, в. Здесь ориентируемые детали б образуют одну группу положений I и II, характерную тем, что детали имеют одну и ту же высоту. Перемещаясь по вибротранспортеру 5, они проходят через позицию ориентирования, включающую осветитель 1, линзу 2, диафрагму 3 и экран 4 с фотоэлементами ФЭ1 и ФЭ2. Фотоэлементы расположены так, что тень от движущейся в положении I детали не может закрыть их оба сразу. В то же время тень детали, перемещающейся в положении II, на некоторый промежуток времени затемняет оба фотоэлемента. Таким образом, разные положения деталей вызывают разные сигналы в системе контроля и управления положением. Поэтому исполнительный механизм по-разному воздействует на детали, различая их и ориентируя.

## 6. НАКОПИТЕЛИ

Накопители представляют собой устройства, в которых накапливаются в определенном порядке детали, прошедшие этапы первичного (в загрузочных устройствах) и вторичного (в ориентирующих устройствах) ориентирования и контроля параметров и подготовленные, та-

ким образом, для загрузки ими технологического оборудования. Кроме того, накопители служат для сбора деталей, обработанных на технологическом оборудовании (укладываемых в емкости накопителей) для хранения их в ориентированном положении, которое детали занимали в процессе обработки.

Наибольшее распространение в промышленности в качестве накопителей получили кассеты, в которых детали комплектуются в упорядоченном виде и в заданных местах. С точки зрения сопряжения с роботом кассеты являются одним из важнейших звеньев организации рабочей среды. Как и любой накопитель, кассета характеризуется определенной емкостью, т. е. количеством деталей, которые могут разместиться в ней.

Упорядоченное сосредоточение деталей в кассетах сопровождается их одновременной фиксацией, что позволяет проводить над деталью технологические операции обработки или сборки. Особенность и преимущество обработки в кассетах состоит в том, что этот процесс осуществляется одновременно над группой деталей, которая может быть довольно значительной, достигая нескольких десятков или сотен штук. Тем самым резко повышается производительность процессов обработки.

Кассеты как устройства организации среды для работа подразделяются на однопозиционные и многопозиционные. Однопозиционные кассеты представляют собой шахтные магазины (например, трубки), установленные вертикально, горизонтально либо под углом. Детали в них располагаются впритык одна к другой, что существенно уменьшает размеры кассет. Второе преимущество заключается в том, что рабочий орган робота всегда выходит для захвата деталей в одно и то же место. Однако не все детали удается сосредоточить подобным образом или захватить их из такой кассеты.

Наиболее распространены многопозиционные кассеты, в которых детали пространственно рассредоточены и разделены одна от другой. Чаще всего такое рассредоточение осуществляется в одной плоскости, поэтому кассеты обычно имеют вид прямоугольной пластины с захватами, в которых фиксируются детали. ЗУ, как правило, является гнездо-ячейка, выполненная по форме детали и обеспечивающая размещение в ней только одной детали и в заданном положении. Преимущество таких кассет состоит в том, что в них можно кассетировать более сложные детали, а емкость их обычно выше, чем у кассет однопозиционных. Недостаток заключается в необходимости перемещать кассету в процессе работы, чтобы подводить гнезда к захватываемой детали в точку размещения ЗУ робота. Если же кассета остается неподвижной, ЗУ должно каждый раз выводиться в новую точку на другую деталь.

Кассета плоского типа наиболее широко используется в качестве органов обслуживания ПР первого поколения. Поэтому автоматизация загрузки кассет — кассетирование — является актуальной задачей. Кассетирование представляет собой сложный процесс и существенно отличается от загрузки с помощью бункерных загрузочных устройств. Поэтому традиционная схема загрузки (включающая бункерно-ориенти-

рующее устройство, транспортер, питатель и т. п.) здесь нецелесообразна, и необходимы средства и методы одновременной загрузки большой группы деталей.

Кассетирование возможно осуществлять двумя принципиально различными методами. *Первый метод* состоит в том, что полностью ориентированные детали устанавливаются в гнезда кассеты (захваты) упорядоченно по определенному плану. Здесь процесс детерминирован как в пространстве, так и во времени, что и определяет преимущества данного метода. Именно такой метод загрузки кассет представляет, в частности, ручная укладка деталей в гнезда. Применение метода ограничено вследствие невысокой производительности. В основном метод используется для загрузки кассет деталями, которые могут занять в гнездах несколько различных положений, а также деталями сложной формы, когда их автоматическое ориентирование не представляется возможным или затруднено.

*Второй метод* применяется значительно шире и заключается в том, что гнезда заполняются деталями самопроизвольно и в большой их массе. Следовательно, процесс загрузки является случайным и описывается вероятностными законами.

Наиболее распространена вибрационная загрузка кассет, которая имеет две разновидности. Первая разновидность характеризуется тем, что детали высыплются на кассету по всей ее поверхности в неупорядоченном состоянии и в количестве, большем, чем число гнезд в кассете, после чего последней придаются колебательные движения вдоль ее плоскости. Детали совершают при этом возвратно-поступательные движения по поверхности кассеты, некоторые западают в гнезда, ориентируются и остаются в них.

Вторая разновидность вибрационной загрузки отличается тем, что засыпанные группой детали поступательно перемещаются вдоль поверхности кассеты, заполняя в процессе этого движения ее гнезда.

Основные параметры, определяющие процесс кассетирования, — его производительность и качество. Следует иметь в виду, что поскольку загрузка кассет подчиняется вероятностным законам, заполнение ее гнезд за данный промежуток времени каждый раз будет различным. Чем больше гнезд будет занято ориентированными деталями, тем качество кассетирования выше, и наоборот. Этот параметр численно определяется через коэффициент загрузки (заполнения)  $\eta$  и представляет собой отношение количества  $S_3$  заполненных гнезд к общему числу  $S$  гнезд в кассете, т. е.  $\eta = S_3/S$ . Очевидно, что  $1 \geq \eta \geq 0$ .

Коэффициент  $\eta$  зависит как от конструктивных параметров детали и кассеты, так и от режима колебаний вибропривода последней [12]. Чтобы обеспечить высокий коэффициент  $\eta$ , на кассету засыпают большее количество деталей, чем имеется на ней гнезд  $S$ . Если число засыпанных деталей равно  $T$ , величина  $a = T/S$  характеризует избыток деталей на кассете. Можно предположить, что чем больше  $a$ , тем выше будет коэффициент  $\eta$ . Однако такое положение верно только до определенного предела, так как при больших отношениях  $a$  детали мешают одна другой попасть в гнезда. Обычно принимают  $a \leq 4 \dots 8$ .

Типовые конструкции кассетирующих устройств весьма многообразны, здесь же рассматриваются лишь наиболее оригинальные из них.

Одно из наиболее простых и эффективных кассетирующих устройств — параметрическое [77] (рис. 3.14). На рис. 3.14, а изображены кассетируемые детали, которые могут занимать ряд различных положений, среди которых наиболее устойчивы два — с опорой на верхний и нижний торцы.

Устройство (рис. 3.14, б) состоит из рамы 1 и проволочной сетки 2. Рама установлена на роликовых направляющих (на рисунке не пока-

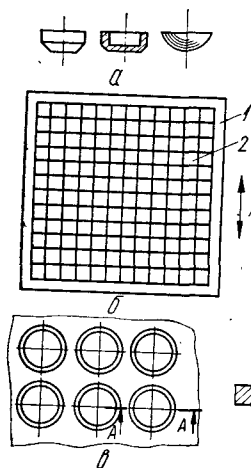
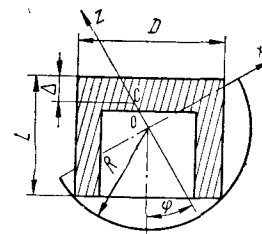


Рис. 3.14. Параметрическое устройство группового кассетирования:  
а — ориентированные детали; б — схема решетки;  
в — пластина с гнездами

Рис. 3.15. Расчетная схема полусферического гнезда кассеты



заны). Колебания происходят в горизонтальной плоскости (по стрелке А) с частотой 300 двойных ходов в минуту с размахом 10 мм.

Засыпанные на сетку детали быстро разворачиваются и устанавливаются в ячейках сетки по одной так, как показано на рис. 3.14, а. Ориентирование и установка деталей типа колпачков происходит за 30...40 колебаний рамы, т. е. за время порядка 8...10 с. Размеры клеток-гнезд, образованных сеткой, определяются размерами деталей — в первую очередь, их диаметром, а также высотой и параметрами скругления у доньшка. В кассете (на сетке) происходит накопление только тех деталей, которые находятся на сетке в наиболее устойчивом из всех возможных положений (т. е. указанных на рис. 3.14, а).

Видоизменение устройства изображено на рис. 3.14, в. Оно отличается от рассмотренного тем, что вместо сетки на раме размещена пластина с отверстиями. Как и в предыдущем случае, разворот и накопление деталей происходит от того, что указанные положения являются наиболее устойчивыми. Еще более активно разворачиваются детали, если гнезда на пластине имеют вид полусферы.

Рассмотрим условия разворота осесимметричной цилиндрической детали типа стаканчика, помещенной в полусферическое гнездо ориентирующей кассеты. Действие сил трения со стороны гнезда на деталь

не учитывается, поскольку в вибрирующей кассете значение сил трения, препятствующее развороту, практически сводится к нулю.

На рис. 3.15 показана расчетная схема этого устройства. Точка  $C$  представляет собой центр тяжести детали,  $\varphi$  — угол отклонения оси детали от вертикали,  $R$  — радиус сферы,  $\Delta$  — расстояние от торца детали до центра ее тяжести,  $D$  и  $l$  — габаритные размеры детали. Деталь должна занять в гнезде одно устойчивое различимое положение — доннышком вниз, причем ее ось должна совпадать с координатной  $Oz$ .

Условие разворота детали в требуемое положение имеет вид

$$\sqrt{\Delta^2 + D^2/4} < R < \sqrt{(l - \Delta)^2 + D^2/4}. \quad (3.1)$$

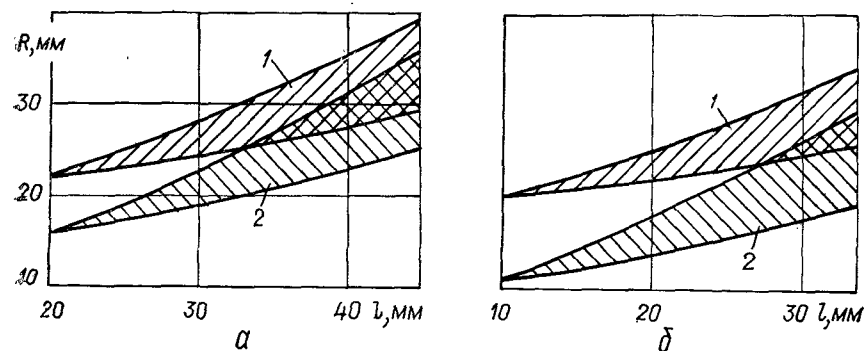


Рис. 3.16. Области существования разворачивающих детали моментов:  
а —  $\Delta = 10$  мм; б —  $\Delta = 5$  мм; 1 —  $D = 40$  мм; 2 —  $D = 20$  мм

Условие (3.1) является необходимым и достаточным для разворота детали в требуемое положение (доннышком вниз), поскольку все остальные положения неустойчивы.

На графиках рис. 3.16, а, б показаны зависимости, ограничивающие область существования таких размеров ориентируемых деталей и радиуса  $R$ , при которых возможен разворот последних в одно устойчивое положение. Эти области построены для двух значений смещения центра тяжести детали:  $\Delta = 5$  мм и  $\Delta = 10$  мм. Из графиков следует, что имеются достаточно большие интервалы радиуса  $R$ , при которых разворот и ориентирование деталей возможны, причем с ростом длины  $l$  детали они расширяются. Нижний предел значения  $l$  существенно зависит от значения  $\Delta$ , при меньших  $\Delta$  этот предел смещается влево. Очевидно, что при  $\Delta = l/2$  центр тяжести детали находится на середине ее длины и ориентирование не требуется.

При обслуживании (загрузке и разгрузке) плоских кассет, подобных описанным выше, в составе РТК требуется наличие механизмов двухкоординатного перемещения, которые подводят очередное гнездо (ячейку) кассеты с захватываемой деталью под ЗУ робота. Выполнение такого механизма усложняет конструкцию РТК в целом. Поэтому более целесообразно, чтобы кассета представляла собой конструкцию, исключаяющую необходимость перемещения ее в плоскости при обслуживании ПР.

Удачным конструктивным решением, позволяющим удовлетворить как условия рациональной загрузки кассеты, так и обслуживания ее манипуляционной системой робота, следует считать приведенную на рис. 3.17, а многорядную змейковую кассету. Она состоит из набора отдельных полос-звеньев 4 с гнездами и в процессе загрузки представляет собой плоский прямоугольный орган. Полосы соединены друг с другом с помощью шарниров и поэтому могут быть растянуты «змейкой». После загрузки деталями такая кассета вводится одним из своих крайних звеньев в направляющее 3 таким образом, чтобы первое гнездо находилось под захватом манипулятора 2. После того, как за-

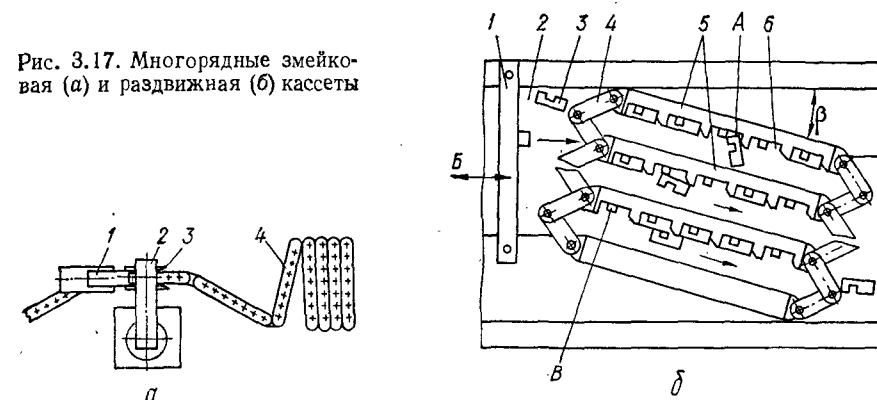


Рис. 3.17. Многорядные змейковая (а) и раздвижная (б) кассеты

хват взял деталь из гнезда, механизм 1 шагового перемещения полос передвигает на один шаг звено 4, и под захват подводится очередная деталь.

При работе шагового механизма полосы увлекаются друг за другом, образуя гибкую плетть и развертываясь в рабочей зоне в ленту, чем обеспечивается однокоординатное перемещение элементов кассеты. Таким образом, вместо механизма двухкоординатного перемещения в данном случае применен механизм однокоординатного перемещения, что существенно упрощает конструкцию агрегата. После прохождения рабочей зоны полосы опять складываются в кассету, которая в таком виде передается на автомат загрузки деталями.

Значительную трудность как при захвате, так и при бункерной подаче и ориентировании представляют детали, занимающие на определяющих поверхностях большое число различных положений (четыре—восемь и более). Установка таких деталей в кассету также вызывает затруднения, преодолеть которые путем использования обычных кассет с неизменяемыми гнездами очень сложно.

Для решения подобной задачи целесообразно применять кассеты с изменяемой конфигурацией и размерами. Это позволяет более рационально расположить детали относительно захватных органов, какими являются гнезда кассеты, а также осуществить необходимые развороты и перемещения первых относительно гнезд. Примером подобного решения может служить многорядная раздвижная кассета

(рис. 3.17, б), в которой осуществляется ориентированная укладка и захват плоских деталей 3, занимающих четыре и более различных положений. В процессе загрузки детали 3 засыпаются на виброплатформу 2 с некоторым избытком и движутся по ней слева направо, проходя под пластиной 1.

Кассета состоит из отдельных полос 5, соединенных друг с другом посредством шарнирных параллелограммов 4. Кассета заполняется деталями 3 на платформе 2, к которой она крепится и которая в процессе работы направленно вибрирует по стрелке Б. Угол расположения кассеты относительно основания  $\beta = 10...15^\circ$ .

Кассета выполнена таким образом, что может быть раздвинута в «гармошку», и между двумя соседними полосами образуется промежуток, в котором свободно размещаются детали. В полосах выполнены гнезда 6, форма которых соответствует конфигурации ориентируемых деталей (в данном случае гнезда имеют выступы В).

Если деталь направлена так, как показано на рисунке, то, проходя вдоль полосы, она попадает в гнездо последней (если оно еще не занято) и занимает положение, определенное его формой. Во всех остальных трех различных положениях деталь в гнезде не удерживается, так как разворачивается под действием моментов сил трения между нею и платформой и движется дальше вправо, попадая в следующее гнездо или выходя из кассеты вообще. Пример разворачивающейся детали А показан на рисунке.

Поскольку полосы расположены к направлению потока деталей под углом, большинство деталей, двигаясь вправо, контактирует с полосами и разворачивается своей длинной стороной вдоль полосы. Это способствует их качественному и быстрому западанию в гнезда. Затем кассета сводится так, что детали оказываются зажатыми в гнездах. После этого она удаляется вместе с находящимися в ее гнездах деталями на рабочую позицию, а на платформу ставится другая кассета. Если кассета остается на платформе, она служит накопителем, из которого забираются при разгрузке кассеты попавшие в гнезда детали. При этом вибропривод платформы, как правило, отключается.

Оснащение робототехнических комплексов накопителями кассетного типа позволяет обеспечить эффективную и плановую подачу под захватные устройства робота полностью ориентированных деталей. Тем самым существенно упрощается структура и система управления роботом, оперирующим с полностью организованной рабочей средой. Для эффективного использования кассетного оборудования необходимо обеспечение наиболее производительной загрузки кассет ориентированными деталями, что достигается оптимизацией этого процесса.

Известно, что цикловая производительность любой рабочей машины [16, 37]

$$Q_u = S / (t_p + t_x), \quad (3.2)$$

где  $S$  — число загруженных в кассету деталей;  $t_p$  — производительно затраченное время;  $t_x$  — время холостых ходов. Очевидно, что число загруженных в кассету деталей равно числу  $S$  гнезд кассеты.

Формулу (3.2) можно представить в виде

$$Q_u = Q_T S / (Q_T t_x + S), \quad (3.3)$$

где  $Q_T = S / t_p$  — технологическая производительность.

Если в выражении (3.3) числитель и знаменатель разделить на  $S$ , получим

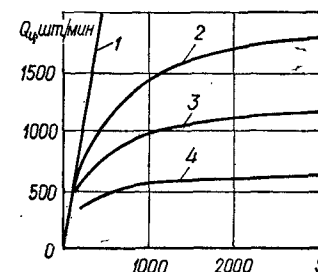
$$Q_u = \frac{Q_T}{Q_T t_x / S + 1}. \quad (3.4)$$

Отсюда следует, что цикловая производительность всегда меньше технологической. Однако, если в формуле (3.4) принять, что  $S \rightarrow \infty$ , всегда получим, что  $Q_u \rightarrow Q_T$ . Таким образом, кассетная оснастка, являющаяся оснасткой дискретного действия, принципиально обладает возможностями оборудования непрерывного действия.

Из приведенных рассуждений следует, что для повышения производительности процесса загрузки кассет следует увеличивать количество  $S$  их гнезд. Поскольку за-

Рис. 3.18. Зависимости цикловой производительности от числа гнезд кассеты:

1 —  $\eta = 1$ ; 2 —  $\eta = 0,97$ ; 3 —  $\eta = 0,95$ ; 4 —  $\eta = 0,9$



полнение гнезд кассеты является вероятностным процессом и их количество, занятое деталями, случайная величина, при загрузке кассет некоторое количество гнезд останется незагруженным. На дозагрузку этих гнезд требуется дополнительное время, которое определяется из выражения  $t_p = t_1 + t_2$ , где  $t_1$  — основное время загрузки;  $t_2 = S(1 - \eta)t_0$  — дополнительное время, необходимое на дозагрузку незаполненных гнезд;  $t_0$  — время, потребное на дозагрузку одного гнезда;  $\eta$  — коэффициент загрузки, определяемый как отношение числа загруженных гнезд  $S_a$  к числу  $S$  гнезд в кассете.

Тогда цикловая производительность (3.4) с учетом  $t_p$

$$Q_u = \frac{S}{t_1 + S(1 - \eta)t_0 + t_x}. \quad (3.5)$$

На графиках рис. 3.18 показаны зависимости  $Q_u = f(S)$ . Из них следует, что с ростом  $S$  цикловая производительность стремится к определенному пределу, существенно зависящему от коэффициента загрузки  $\eta$ .

Кассетирование обеспечивается двумя видами движения деталей относительно кассеты: возвратно-поступательным и поступательным. Для каждого из видов оптимальная производительность определяется в зависимости от режима работы.

Производительность загрузки первого вида. Основное время загрузки определяется из выражения  $t_1 = n/v$ , где  $n$  — число циклов

колебаний кассеты, за которое осуществляется ее загрузка;  $\nu$  — частота колебаний кассеты, Гц. Тогда из выражения (3.5)

$$Q_T = \frac{S}{n/\nu + S(1-\eta)t_0} \quad (3.6)$$

Величина  $Q_T$  имеет максимум при определенном цикле колебаний, так как первое слагаемое знаменателя в формуле (3.6) с увеличением  $n$  растет, а второе уменьшается. Это объясняется тем, что коэффициент  $\eta$  с ростом  $n$  также растет. Коэффициент

$$\eta = nB/(1+nB), \quad (3.7)$$

где  $B$  — коэффициент, учитывающий количество деталей, приходящихся на одно гнездо, форму деталей, конструкцию гнезда и т. п. Подставив выражение (3.7) в формулу (3.6) и учитывая, что  $Q_T = S/t_p$ , получаем

$$t_p = \frac{n}{\nu} + t_0 S \frac{1}{1+nB}. \quad (3.8)$$

Чтобы определить оптимальное значение числа колебаний кассеты  $n_{\text{опт}}$ , приравняем к нулю производную  $dt_p/dn$  и решим полученное выражение относительно  $n$ .

Тогда

$$n_{\text{опт}} = \frac{\sqrt{St_0 B \nu} - 1}{B}.$$

С учетом значения  $n_{\text{опт}}$  производительность

$$Q_T \max = \frac{1}{\frac{\sqrt{St_0 B \nu} - 1}{BS\nu} + \frac{t_0}{\sqrt{BS t_0 \nu}}}.$$

Таким образом, с увеличением числа гнезд  $S$ , как и частоты колебаний  $\nu$ , растет производительность процесса загрузки данного вида.

Производительность загрузки второго вида. Здесь время загрузки  $t_1$  определяется длиной кассеты  $L$  и скоростью  $\nu$  поступательного движения деталей. Поэтому  $t_1 = L/\nu$ . В свою очередь,  $L$  можно выразить через количество гнезд  $k$  в продольном ряду кассеты и расстояние  $l$  между ними. Тогда  $t_1 = kl/\nu$ .

Цикловая производительность

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{l/m\nu + (1-\eta)t_0 + t_{\text{xs}}}, \quad (3.9)$$

где  $m = S/k$  — количество продольных рядов кассеты;  $t_{\text{xs}} = t_x/S$ .

Из формулы (3.9) видно, что цикловая производительность зависит не только от числа  $S$  гнезд, но и от расположения их, т. е. от значений  $k$  и  $m$ . Возможны три способа увеличения  $Q_{\text{ц}}$  при изменении  $S$  и соотношения  $k$  и  $m$ . Рассмотрим эти способы:

1. Число гнезд кассеты изменяется за счет изменения количества  $k$  гнезд в продольном ряду при  $m = \text{const}$ .

Тогда

$$Q_{\text{ц}} \max = \lim_{k \rightarrow \infty} Q_{\text{ц}} = m\nu/l.$$

2. Число гнезд кассеты изменяется за счет изменения числа  $m$  продольных рядов при  $k = \text{const}$ . Если  $m \rightarrow \infty$ ,

$$Q_{\text{ц}} \max = \lim_{m \rightarrow \infty} Q_{\text{ц}} = \frac{1}{(1-\eta)t_0}.$$

3. Количество  $S$  гнезд кассеты остается неизменным, изменяется соотношение между числом  $k$  гнезд в продольном ряду и числом  $m$  таких рядов, т. е.  $S = \text{const}$ ,  $S \geq k \geq 1$ ,  $S \geq m \geq 1$ . Из зависимости  $Q_{\text{ц}} = f(S)$  видно (см. рис. 3.18), что с ростом  $S$  цикловая производительность быстро растет лишь в начале до  $Q_{\text{ц}} \approx 0,8Q_{\text{ц}} \max$ . Дальнейший рост  $S$  мало влияет на  $Q_{\text{ц}}$ . Кроме того, в кассете число гнезд всегда конечное. Поэтому из всех трех рассмотренных способов повышения производительности последний предпочтительнее. Он позволяет найти оптимальное число  $k_{\text{опт}}$  гнезд в продольном ряду, соответствующее  $Q_{\text{ц}} \max$ .

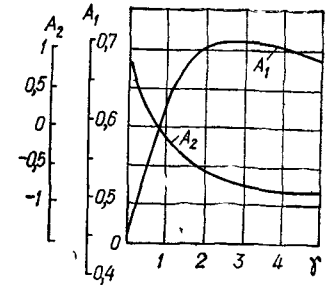


Рис. 3.19. Графики зависимости коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  от значения  $\gamma$ .

Сложную теоретическую формулу для нахождения  $k_{\text{опт}}$  можно заменить более простой и точной эмпирической формулой

$$\lg k_{\text{опт}} = A_1 \lg S + [A_2 - 0,146(aB - 1)], \quad (3.10)$$

где коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  определяем из графика (рис. 3.19) в функции  $\gamma = L/(t_0\nu)$ ;  $a = T/S$ ;  $T$  — количество деталей, одновременно засыпаемое на кассету;  $B$  — коэффициент, учитывающий влияние конструкции кассеты, гнезда и загружаемой детали [82].

Подставляя значение  $k_{\text{опт}}$  из выражения (3.10) в формулу (3.9), получаем значение максимальной цикловой производительности. При  $k \geq k_{\text{опт}}$  цикловая производительность уменьшается.

Условия заполнения деталями каждого поперечного ряда гнезд кассеты одинаковы. Поэтому рассмотрим загрузку гнезд лишь одного продольного ряда, включающего  $k$  гнезд. Над этим рядом проходит группа из  $n$  деталей, причем  $n \geq k$ . Примем, что вероятность западания детали на  $i$ -м гнезде ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) равна  $g$ .

К задаче применима схема однородной цепи Маркова с дискретным параметром, если в качестве системы рассматривать группу  $n$  перемещаемых над продольным рядом деталей, а под номером состояния понимать число деталей в группе. Цепь Маркова с дискретным параметром задана, если заданы начальные вероятности  $p_i(0)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , которые записываются в виде матрицы строки  $\|p_i(0)\| = \|p_1(0) p_2(0) \dots\|$ , и веро-

ятности перехода  $p_{ij}(n, n+1)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  для каждого шага  $n = 0, 1, 2, \dots$ , которые можно записать в виде матрицы

$$\|p_{ij}(n, n+1)\| = \begin{vmatrix} p_{11}(n, n+1) & p_{12}(n, n+1) & \dots \\ p_{21}(n, n+1) & p_{22}(n, n+1) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}.$$

Для однородной цепи вероятности состояний определяют из матричного равенства

$$\|p_i(n)\| = \|p_i(m)\| \cdot \|p_{ij}\|^{n-m}, \quad (3.11)$$

где  $n$  — любое целое число, удовлетворяющее условию  $0 \leq m \leq n$ . Элементы матрицы  $\|p_{ij}\|^{n-m}$  представляют собой вероятности  $p_{ij}(n-m)$  перехода за  $n-m$  шагов.

Для данного случая начальное распределение вероятностей определяется следующим образом:

$$p_0(0) = p_1(0) = p_2(0) = \dots = p_{n-1}(0) = 0; \\ p_n(0) = 1$$

или в матричном виде

$$\|p_i(0)\| = \|0 \ 0 \ \dots \ 1\|. \quad (3.12)$$

Специфика рассматриваемой системы состоит в том, что она не может переходить из состояний с меньшими номерами в состояния с большими номерами, так как запавшие в гнезда детали в последних и остаются. Поэтому  $p_{ij} = 0$  при  $i < j$ . Если же  $i \geq j$ , то вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  равна вероятности западания  $i-j$  деталей, которая задается биномиальным распределением

$$p_{ij} = C_{i-j}^{i-1} g^{i-j} (1-g)^j,$$

где  $g$  — вероятность западания детали в гнездо кассеты.

В развернутой форме

$$p_{ij} = \frac{i!}{j!(i-j)!} g^{i-j} (1-g)^j.$$

Матрица переходных вероятностей имеет вид

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ g & 1-g & 0 & 0 \\ g^2 & 2g(1-g) & (1-g)^2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g^k & kg^{k-1}(1-g) & \frac{k^2-1}{2} g^{k-2}(1-g)^2 \dots & (1-g)^k \end{vmatrix}. \quad (3.13)$$

Подставляя выражения (3.12) и (3.13) в равенство (3.11), получаем искомые распределения. Поскольку  $\|p_i(0)\| = \|0 \ 0 \ \dots \ 1\|$ , вероятности  $p_i(k)$  будут записаны в нижней строке матрицы  $\|p_{ij}\|^k$ . Так, например, для  $(n-1)$ -го шага

$$p_i(1) = \|g^k kg^{k-1} \frac{k^2-1}{2} g^{k-2}(1-g)^2 \dots (1-g)^k\|. \quad (3.14)$$

Для получения распределения абсолютных вероятностей на шаге  $n$  необходимо возвести в  $n$ -ю степень матрицу (3.14), нижняя строка которой и будет искомым распределением.

Полученные распределения позволяют найти любые другие характеристики состояния группы деталей, заполняющих гнезда кассеты, в том числе математическое ожидание  $M[N(k)]$  количества деталей, прошедших через все гнезда ряда и не запавших в них, которое определяется по формуле

$$M[N(k)] = \sum_{i=1}^n i p_i(k) = n(1-g)^k. \quad (3.15)$$

Так как общее число всех деталей, приходящихся на один ряд, равно  $n$ , количество запавших в гнезда деталей

$$n_0 = n[1 - (1-g)^k]. \quad (3.16)$$

Если принять, что все гнезда кассеты будут заняты, т. е.  $n_0 = k$ , и коэффициент загрузки  $\eta = 1$ , формула (3.16) представится как

$$k = n[1 - (1-g)^k]. \quad (3.17)$$

Отсюда при заданной вероятности  $g$  можно определить число  $n$  деталей, которые следует подать на кассету, чтобы

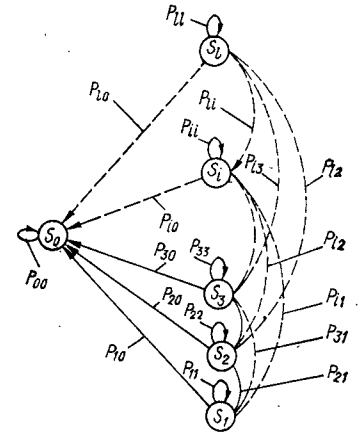


Рис. 3.20. Ориентированный граф загрузки кассеты деталями

обеспечить указанный коэффициент  $\eta = 1$ . Из зависимости (3.17) следует, что

$$n = \frac{k}{1 - (1-g)^k}. \quad (3.18)$$

Формула (3.18) показывает, что при малом числе  $k$  гнезд количество деталей  $n$  должно быть больше, а при увеличении  $k$   $n$  уменьшается. Очевидно, в пределе, когда  $k \rightarrow \infty$ ,  $n \rightarrow k$ , т. е. при большом числе гнезд на кассету следует подавать такое же число деталей.

Если принять  $g = 0,1$ , то для  $k = 1$  число деталей  $n = 10$ , а  $a = n/k = 10$ ; для  $k = 10$  число деталей  $n \approx 15$ , т. е.  $a = 1,5$ ; для  $k = 20$   $a = 1,15$ . Таким образом, практически число засыпаемых на кассету деталей равно числу гнезд. Следовательно, с точки зрения уменьшения числа  $n$  деталей на кассете целесообразно увеличивать число гнезд в ее продольных рядах.

Поведение системы загружаемых в кассету деталей показано на рис. 3.20 в виде ориентированного графа, узлами которого служат состояния этой системы, а ребрами — направления возможных переходов, возле которых указаны значения их вероятностей. Из структуры графа видно, что состояния  $S_1, S_2, \dots, S_i$  являются невозвратными, а состояние  $S_0$  — поглощающим ( $i = 1, 2, \dots, k, \dots, l$ ).

На первом шаге система из исходного состояния  $S_i$  может с определенной вероятностью перейти в одно из  $i$ -х состояний или остаться в нем. При следующем шаге система также может из любого большего состояния перейти в меньшее или остаться в предыдущем. В этом случае вероятности переходов определяются матрицей (3.13), возведенной в степень, равную шагу, при котором система рассматривается.

## Глава IV

### МЕХАНИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

#### 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЯ РОБОТОВ

Как известно, для перемещения тела в пространстве и для его произвольной ориентации исполнительный механизм должен иметь не менее шести степеней подвижности: три — для осуществления транспортных (переносных) движений и три — для ориентирующих движений. Примером служит человеческая рука, которая имеет от предплечья до фаланг пальцев 22 степени подвижности, что и предопределяет универсальные возможности человека при выполнении им про-

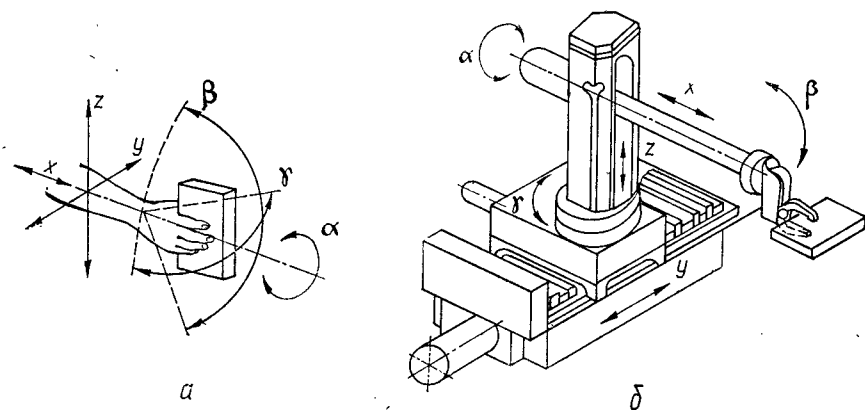


Рис. 4.1. Схемы ориентирующих и транспортных перемещений руки человека (а) и механизма с эквивалентной совокупностью движений (б)

изводственных функций (рис. 4.1, а). Однако, как следует из рисунка, вся совокупность движений кинематических звеньев руки человека сводится к транспортным (переносным) движениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в декартовой системе координат, а также к ориентирующим движениям  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  относительно соответствующих координат. Поэтому эквивалентом человеческой руки может быть механизм, имеющий ту же совокупность движений, к которой в общем случае сводятся движения человеческой руки (рис. 4.1, б). Такой механизм является промышленным роботом с шестью основными степенями подвижности  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , а также с седьмой степенью подвижности, обеспечивающей движение губок ЗУ.

Кинематическая структура ПР и их двигательные возможности определяются видом и последовательностью расположения кинематических пар. В свою очередь, требуемый характер движения рабочих органов ПР при выполнении вспомогательных и технологических операций и переходов определяется производственными условиями. При этом различают глобальные, региональные и локальные движения [16, 57]. *Глобальные движения* — это перемещения на расстоянии, превышающие размеры самого робота, когда необходимо обслуживать протяженные технологические объекты (линии). Возможность совершать глобальные движения определяет мобильность робота, который для реализации таких движений снабжается подвижным основанием; в противном случае робот стационарен.

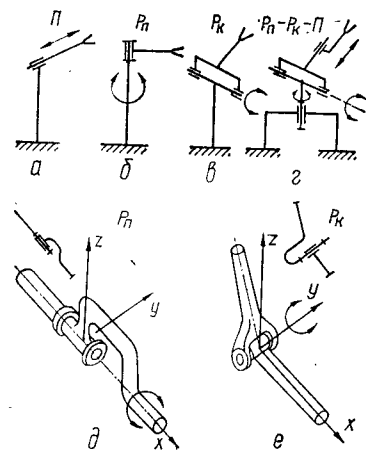
*Региональные движения* — это перемещения рабочих органов ПР в различные зоны рабочего пространства, определяемого размерами кинематических звеньев стационарных роботов; причем определяющими конфигурацию и размеры рабочего пространства робота и его маневренность являются звенья кинематики руки. Региональные движения относятся, таким образом, к внутриоперационным.

*Локальные движения* рабочих органов — перемещения, соизмеримые с их размерами. Это, главным образом, ориентирующие и транспортные возможности кисти, за счет которых обеспечиваются ориентация объектов, их установочные (точные) перемещения, движения губок, т. е. технологические движения.

Как ориентирующие, так и транспортные движения должны выполняться с высокой точностью совокупного участия всех звеньев кинематической структуры ПР. Поэтому при создании копирующих физические функции руки роботов приходится учитывать не только наличие звеньев, обеспечивающих совокупность движений, но также вид и последовательность их расположения в структуре.

В зависимости от используемых видов кинематических пар в структуре ПР создаются поступательные, вращательные и комбинированные группы движений, причем число комбинаций пар обеспечивает 60 совокупностей индексов подвижности, и следовательно, — 60 типов кинематических структур ПР. Однако число кинематических структур намного больше, так как оно определяется не только количеством кинематических пар, но и последовательностью их расположения [34]; в этом случае индекс подвижности имеет направленный граф. Например, для компоновки, изображенной на рис. 4.1, б, структуру можно описать последовательностью  $\vec{Y}-\vec{\gamma}-\vec{Z}-\vec{X}-\vec{\alpha}-\vec{\beta}$ . Для конструктивной реализации последней предусматривается подвижное основание ( $y$ ), на котором установлена вращающаяся стойка ( $\gamma$ ), обеспечивающая подъем ( $z$ ) руки ( $x$ ) робота; рука заканчивается приводом поворота ( $\alpha$ ) кисти и качания ( $\beta$ ) ЗУ. Таким образом, использование кинематических пар пятого класса — поступательных (рис. 4.2, а), ротационных с осью вращения, параллельной оси звеньев кинематической пары (рис. 4.2, б, д), а также с осью вращения, перпендикулярной оси

одного из звеньев пары (рис. 4.2, в, е) — в сочетании с теми или иными требуемыми группами движения дают возможность создавать ПР с необходимыми рабочими зонами функционирования и работающими



в определенной (заданной) системе координат. При этом не всякая структура разомкнутой цепи, содержащая три и более кинематических пар пятого класса, обеспечивается механизмом, структурная схема которого удовлетворяет, например, одному из следующих условий [13]: имеются три поступательные пары, оси которых непараллельны (взаимно перпендикулярны) (рис. 4.3, а); имеются

Рис. 4.2. Структуры кинематических пар пятого порядка:

а — поступательных  $P$ ; б, д — ротационных  $P_p$ ; в, е — ротационных  $P_k$ ; г — с сочетанием поступательных и ротационных движений

две поступательные пары с непараллельными (перпендикулярными) осями и ротационная пара, ось которой не перпендикулярна плоскости, образованной направлениями осей поступательных пар (рис.

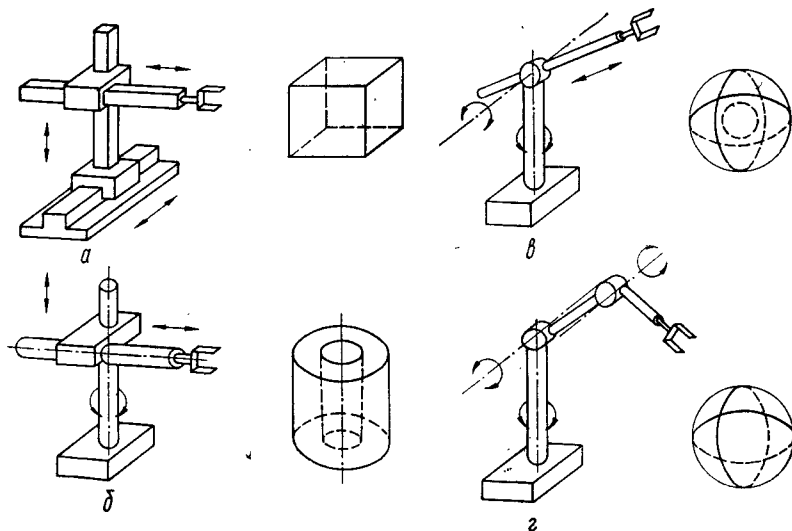


Рис. 4.3. Рабочие сочетания кинематических пар в ПР в прямоугольной (а), цилиндрической (б) и сферической (в, г) системах координат

4.3, б); две ротационные пары, оси которых непараллельны (перпендикулярны), и одна поступательная пара (рис. 4.3, в); две ротационные пары с параллельными осями и одна ротационная пара с осью, не

параллельной осям двух других пар (рис. 4.3, г). Таким образом, возможно осуществить четыре различные схемы ПР, работающие, соответственно, в прямоугольной, цилиндрической, сферической системах координат с рабочей зоной в виде полый сферы и сферической с рабочей зоной в виде сплошной сферы.

Если предположить, что все четыре схемы ПР обладают сопоставимыми параметрами (например, равной грузоподъемностью, углом поворота  $0...360^\circ$  и линейным перемещением в пределах  $0...1$  отн. ед.), то схема с тремя ротационными парами обеспечивает наибольшую рабочую зону. Вместе с тем ПР, имеющие компоновку по схеме с ротационными парами, обладают наименьшей точностью позиционирования рабочих органов, составляющей  $0,6...0,7$  точности ПР, работающих в прямоугольной системе координат и имеющих только поступательные пары (например, роботы с компоновкой, обеспечивающей работу в цилиндрической системе координат, имеют точность, равную точности в  $0,8...0,85$  в прямоугольной системе). Это обусловлено тем, что при ротации условия соблюдения передаточного отношения оказываются наиболее неблагоприятными и изменяются с вылетом руки.

Каждый вариант кинематической структуры в соответствующей системе координат иллюстрируется конфигурацией рабочей зоны, обслуживаемой ПР. В пределах этого пространства рука робота может вывести ЗУ в любую точку. Возникающие при этом ограничения угловых и линейных перемещений в парах, вызванные особенностями конструктивного оформления ПР, обуславливают запретные зоны, в которых ЗУ не может быть введено.

Геометрия рабочих зон для ПР, работающих в прямоугольной цилиндрической и сферической системах координат, изображена на рис. 4.4. Геометрические параметры, число степеней подвижности и способ установки на рабочем месте являются исходными данными при разработке компоновочных схем и планировок робототехнических комплексов. В целом рабочая зона характеризуется следующими геометрическими параметрами:  $L, G$  — крайние нижнее и верхнее положения руки;  $A$  — положение максимально выдвинутой руки;  $B$  — исходное положение руки;  $C, K$  — ход (вылет) и подъем руки;  $E, Q$  — крайние верхнее и нижнее положения ЗУ;  $r$  — радиус качания ЗУ;  $\alpha$  — максимальный угол поворота (ротации) руки (колонны).

Конфигурации рабочих зон ПР могут быть самыми разнообразными и определяться как сочетанием пар пятого класса, так и последовательностью их расположения. В табл. 4.1 представлены кинематические структуры манипуляционных систем ПР, состоящие из различных сочетаний и последовательностей соединений пар пятого класса (для возможного их сопоставления кинематические структуры разбиты по наличию ротационных  $P$  и поступательных  $P$  пар) [13]. В пределах рабочих зон, обеспечиваемых соответствующей реализацией кинематической структуры, рабочие органы ПР могут быть выведены в любую точку. При этом объем рабочих зон может изменяться при изменении размеров звеньев и углов между осями кинематических пар. Это обстоятельство следует учитывать при выборе (проектировании) кинематической структуры манипуляционной системы ПР, при нало-

жении ограничений, вытекающих из условий его эксплуатации. Из анализа возможных вариантов кинематических структур следует: количество возможных вариантов уменьшается с уменьшением числа ротационных пар; наличие у отдельных структур «двузначности», т. е. возможности работы в теневых участках зон, имеет важное значение при выборе

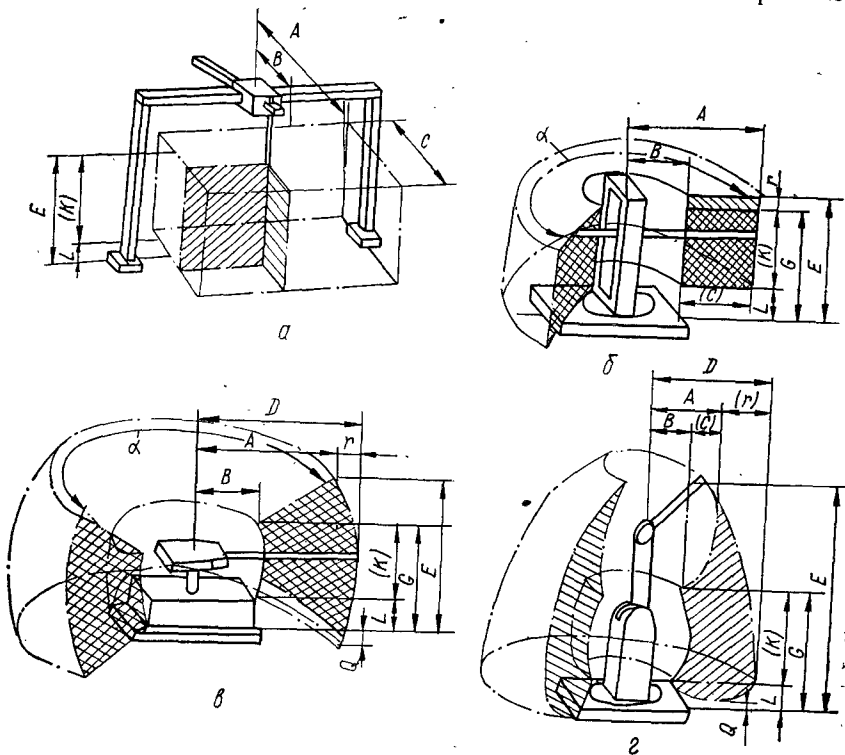


Рис. 4.4. Геометрия рабочих зон для ПР в прямоугольной (а), цилиндрической (б) и сферической (в, г) системах координат

компоновки манипуляционной системы, обеспечивающей обход препятствий. Этим свойством обладают структуры с двумя ротационными парами, имеющими параллельные оси, а также структуры с поступательной и ротационной парами, имеющими взаимно перпендикулярные оси (причем ротационная пара следует перед поступательной); задача произвольной ориентации объекта обеспечивается структурами, имеющими три ротационных пары, оси которых последовательно развернуты на  $90^\circ$ .

При описании процесса манипулирования наибольший практический интерес представляет характер взаимодействия между рабочим органом ПР и объектом производства, т. е. описание движения рабочих органов ПР в области рабочей зоны при необходимости переноса объекта из одной ее точки в другую. В качестве исходной принимают

#### 4.1. Классификация кинематических структур ПР

Сочетание пар	Условное обозначение	Кинематическая структура			
		1	2	3	4
Три вращательные	РРР				
	РРР				—
	РРР				—
	РРР				—
Две вращательные и одна поступательная	РРР				—
	РРР				—
	РРР				—
	РРР				—
Одна вращательная и две поступательные	РРР			—	—
	РРР			—	—
	РРР			—	—
	РРР			—	—
Три поступательные	РРР		—	—	—
	РРР		—	—	—
	РРР		—	—	—
	РРР		—	—	—

точку  $S$  рабочего органа манипуляционной системы, расположенную на его оси симметрии (рис. 4.5). Состояние манипуляционной системы определяется при этом положением руки, а следовательно, вектором  $\vec{r}$ , исходящим из основания ПР до точки  $S$  рабочего органа. Таким образом, началом вектора  $\vec{r}$  является неподвижная система координат  $XYZ$ , а его окончанием — вторая подвижная ортогональная система координат  $X_s Y_s Z_s$ , определяющая ориентацию руки. Вектор  $\vec{r}$  и положение подвижных координат устанавливается положением осей

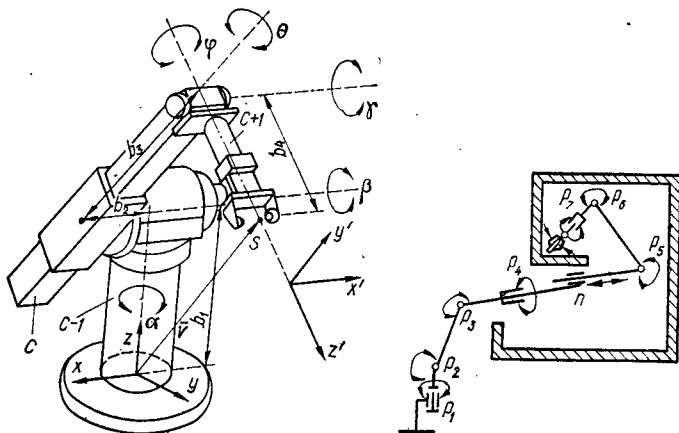


Рис. 4.5. Графическая модель манипуляционной системы ПР

Рис. 4.6. Кинематическая компоновка ПР, обеспечивающая обслуживание «теневых» участков рабочих зон

подвижных звеньев манипуляционной системы. Устанавливая соответствие во времени между указанными системами координат, получают математическое описание движения рабочих органов ПР. Для изображенной на рис. 4.6 структуры ПР вектор

$$\vec{r} = r(x_s, y_s, z_s) = f(\alpha, \theta, b_3, \varphi, \gamma, \beta),$$

где  $\alpha, \theta, b_3, \varphi, \gamma, \beta$  — координаты руки;  $b_1, b_2, b_4$  — постоянные составляющие звеньев ПР (линейные размеры звеньев руки в исходном состоянии);  $x_s, y_s, z_s$  — переменные координаты руки.

Так, в структуре ПР с прямоугольной системой координат (см. рис. 4.3, а) траектория  $S_1-S_2$  обеспечивается за счет совокупности линейных приращений  $\Delta x, \Delta y$  и  $\Delta z$  по соответствующим координатам и определяется выражением

$$\overline{S_1 - S_2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2};$$

в сферической (полной) системе координат (рис. 4.3, а)

$$\overline{S_1 - S_2} = R \sqrt{[\cos(\alpha_y + \Delta\alpha_y) \cos(\alpha_z + \Delta\alpha_z) - \cos\alpha_y \cos\alpha_z]^2 + [\cos(\alpha_y + \Delta\alpha_y) \sin(\alpha_z + \Delta\alpha_z) - \cos\alpha_y \sin\alpha_z]^2};$$

в сферической (сплошной) системе координат (рис. 4.3, а)

$$\overline{S_1 - S_2} = \sqrt{2(R^2 + R\Delta R) \sin^2 \Delta\beta + \Delta R^2}$$

при  $\alpha_z = 0; \alpha_y = 0; \Delta\alpha_z = \Delta\alpha_y = \Delta\alpha;$

в цилиндрической системе координат (рис. 4.3, б)

$$\overline{S_1 - S_2} = \sqrt{2[\Delta R^2 + (1 - \cos \Delta\alpha)(R\Delta R + R^2)]}$$

при  $\alpha_z = 0; z_1 = z = 0; \Delta z = \Delta R; \Delta\alpha_y = \Delta\alpha_z = \Delta\alpha.$

Здесь  $R$  — вылет руки в исходном состоянии;  $\Delta R$  — выдвижение руки;  $\alpha_y, \alpha_z$  — исходные угловые положения руки по соответствующей координате;  $\Delta\alpha_y, \Delta\alpha_z$  — угловые перемещения руки по соответствующей координате.

Выбор варианта кинематической схемы манипуляционной системы ПР определяется конкретными условиями и требованиями. Во-первых, она должна обеспечить достаточную степень универсальности функционирования робота с учетом операций, которые ему предстоит выполнять во внешней среде. Во-вторых, должна быть обеспечена наибольшая простота конструкции манипуляционной системы, технологичность ее изготовления, удобство обслуживания и небольшие затраты на эксплуатацию. Манипуляционная система должна прежде всего обеспечивать выведение рабочих органов робота в любую точку заданной рабочей зоны с требуемой точностью и необходимую угловую ориентацию рабочего органа в этих точках. В общем случае (как это было показано выше) выполнение транспортных (переносных) и ориентирующих движений требует как минимум шести степеней подвижности, т. е.  $M \geq 6$ , а с учетом подвижностей  $N$  губок ЗУ общее число степеней подвижности  $K \geq M + N$ . Иногда для придания манипуляционной системе большей маневренности, вызванной необходимостью обхода препятствий в рабочей зоне, обслуживания труднодоступных («теневых») участков зоны пользуются избыточной структурой, когда число степеней подвижности  $K > M + N$ . При этом, как правило, прибегают к компоновкам ПР, работающих в сферической системе координат (рис. 4.6,  $K = 8 + 1$ ). Таким образом, как подтверждает практика, необходимо создавать манипуляционные системы ПР с избыточными степенями подвижности, хотя это требование противоречит условиям обеспечения максимальной точности и простоты конструкции.

Все геометрические параметры, влияющие на объем и конфигурацию рабочей зоны, устанавливают исходя из особенностей согласования ПР с конкретным технологическим оборудованием и степенью подготовленности рабочей среды. В этом смысле определенными преимуществами обладают агрегатные ПР, так как их использование позволяет сократить сроки проектирования, снизить затраты на разработку, внедрение и обслуживание ПР, комплектуемых из унифицированных модулей. Кроме того, сокращаются сроки перехода на выпуск новой продукции в случае создания робототехнических систем на базе ПР с унифицированными модулями, так как при этом повышается гибкость системы в целом, а необходимость в установке нового ПР заменяется переконфигурацией модульного ПР.

В результате анализа возможных компоновок ПР обоснована обобщенная структура манипуляционной системы робота, состоящая из следующих основных элементов: основания; колонны (стойки), крепящейся к основанию; руки (рук), крепящейся к колонне; кисти, укрепленной к руке; технологических механизмов (модулей), крепящихся к кисти; захватного устройства (рабочего органа для технологических ПР), крепящегося к технологическому механизму. Для подвижных ПР добавляются модули: направляющие и тележка (в обоих

основания, базовый модуль 2 для установки и вращения колонны с механизмом 3 возвратно-поступательного вертикального перемещения или механизмом 8 качания руки 7, кисти 6 и технологических механизмов вращения 5 или наклона 4 ЗУ (рабочего органа).

## 2. УПРАВЛЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЕМ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПР

Планирование траектории движения рабочих органов манипуляционной системы осуществляется оператором или с помощью алгоритмов управления планированием на более высоких уровнях иерархии. Эти процедуры в совокупности с последующим решением обратных задач о положении исполнительного механизма для формирования управляющих функций приводов рассматриваются как алгоритмы разделения командного движения по степеням подвижности манипуляционной системы, и их реализация связана с решением нелинейных уравнений, характеризующих конфигурацию механизма при заданном положении рабочих органов ПР. Для решения таких задач прибегают либо к помощи ЭВМ, либо к имитационному моделированию на физических объектах с использованием реальных моделей манипуляционных систем ПР, искусственно помещая рабочие органы в различные текущие положения и определяя таким образом характерные точки будущей траектории (в частности, так поступают в процессе обучения промышленного робота).

Для линеаризации уравнений, описывающих поведение манипуляционной системы при малых изменениях координат элементов механизма, дифференцируют по времени координаты положения звеньев в сложном механизме, описываемых нелинейными зависимостями. После этого скорости изменения координат положения звеньев для каждой конфигурации будут уже удовлетворять линейным уравнениям. При этом важно, чтобы все приращения изменений координат элементов манипуляционной системы ПР были достаточно малыми, так как в противном случае такая линеаризация приведет к значительным погрешностям. В результате линеаризации обеспечивается линейная связь между действующими на ЗУ внешними силами и обобщенными силами, отнесенными к координатам  $q_c$  (где  $c = 1, \dots, N$ ). Линейные уравнения относительно скоростей, приращений положений звеньев и действующих сил являются основой для решения задач управления приводами манипуляционной системы. При этом во всех случаях движение исполнительными механизмами планируется на уровне поведения рабочих органов ПР. Как правило, за оператором остаются функции выбора желаемой скорости (значение и направление) перемещения рабочих органов или определения нового положения ЗУ, в которое оно должно быть выведено (последнее может быть задано системой сил, которая, будучи приложенной к ЗУ, выведет его в требуемое положение). Задача управления заключается в том, чтобы на основании этой информации разработать алгоритм оптимального функционирования приводов. При этом возможны следующие методы управления планированием траектории движения рабочих органов ПР [56].

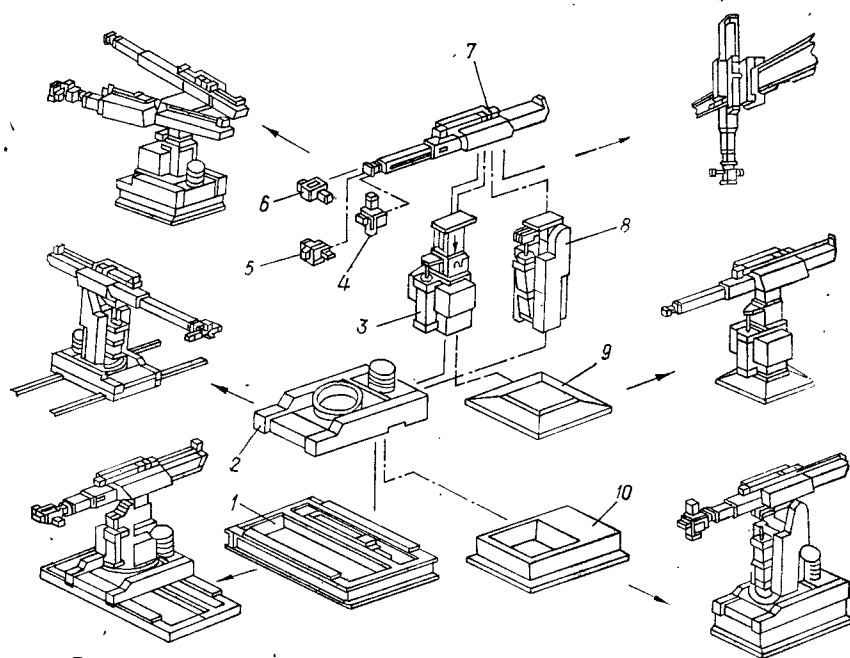


Рис. 4.7. Унифицированные модули манипуляционной системы ПР

случаях для напольного или подвешного исполнения). При этом для быстрой переналаживаемости (перекомпоновки) необходимо наличие унифицированных элементов сопряжения в соединениях рука—кисть—технологический механизм—захватное устройство (рабочий орган) как для смены модуля, так и для изменения структуры изъятием из приведенной выше цепочки соединения промежуточных элементов, не требующихся в конкретной производственной ситуации. Набор унифицированных модулей манипуляционной системы ПР, используемых в различных сочетаниях, позволяет получить оптимальные для конкретных производственных условий компоновки ПР. Такие компоновки обеспечивают необходимый уровень технологической и функциональной универсальности ПР: стационарные с подвижным основанием, подвесные, одно- и двурукие, работающие в декартовой, цилиндрической или сферической системе координат (рис. 4.7). Набор унифицированных модулей включает: подвижное 1 и неподвижные 9, 10

Метод управления по вектору скорости характеризуется заданием скорости движения рабочих органов манипуляционной системы в виде  $4 \times 4$ -матрицы  $T_N$  или в виде шестимерного вектора, представляющего собой проекции векторов угловой скорости  $\vec{\omega}$  рабочего органа и скорости  $\vec{\omega}^0$  его некоторой точки в какой-либо системе координат, которая формируется оператором или предусматривается алгоритмами высшего уровня управления таким образом, чтобы полностью определить скорость рабочего органа в текущей точке траектории.

Системы линейных алгебраических уравнений, характеризующих компоненты векторов  $\vec{\omega}$  и  $\vec{\omega}^0$ , имеют вид

$$\vec{\omega} = \dot{J}\vec{q}; \quad \vec{\omega}^0 = J^0\dot{q},$$

где  $\dot{q}$  — вектор командных скоростей обобщенных координат механизма;  $J$  и  $J^0$  —  $6 \times N$ -матрицы Якоби, зависящие от конфигурации механизма. При числе степеней свободы механизма  $N = 6$  и квадратной матрице Якоби  $J$  для случая невырожденной матрицы получаем  $\dot{q} = J^{-1}\vec{\omega}$ . Непосредственное использование полученного решения для управления ограничивается возможным изменением ранга матрицы  $J$ , так как для максимального ранга матрицы при  $N > 6$  имеет место множество решений  $\dot{q}$ .

Обычно желательна такая конструкция манипуляционной системы, которая обеспечивает наибольшее возможное число степеней подвижности для рабочего органа. В процессе планирования траектории движения могут возникать вырожденные конфигурации механизма, которые должны учитываться алгоритмом управления. Кроме того, необходимо учитывать и то обстоятельство, что звенья манипуляционной системы не должны быть чрезмерно больших габаритов, так как работа таких звеньев будет сопровождаться значительными линейными и угловыми погрешностями при обработке соответствующими приводами управляющих команд.

Компоненты вектора скорости формируются непосредственно оператором на пульте управления в некотором масштабе и поступают в вычислитель для решения системы алгебраических уравнений. Обработка запланированных траекторий контролируется в режиме обучения оператором, так что система управления оказывается замкнутой через него по положению. Каждому положению задающего набора сигналов соответствует определенная (по значению и направлению) скорость движения рабочего органа; такой режим управления является эффективным при необходимости быстрого перевода рабочих органов из одного положения в другое, не требующее высокой точности позиционирования.

**Метод управления по вектору силы.** При использовании метода управления по вектору скорости невозможно формализовать стремление перемещения рабочих органов манипуляционной системы в заданном направлении, если на заданной траектории встречаются точки, в которых матрица Якоби вырождена. Кроме того, этот метод сложно реализовать.

Чтобы упростить процесс управления и связанные с этим вычисле-

ния, используют метод управления по вектору силы, в котором имитационно реализуется идея управления по заданному направлению. В действительности, к рабочим органам ПР не прикладываются никакие силы, но следящие приводы развивают такую совокупность обобщенных сил, которые динамически эквивалентны заданным силам, имитирующим их приложение к рабочим органам. Вычислитель, получив на входе задающие сигналы, определяет обобщенные силы, отнесенные к координатам, непосредственно управляемым приводами. В свою очередь, приводы постоянно вырабатывают такие обобщенные силы, которые получаются на выходе вычислителя. В эти обобщенные силы могут автоматически вводиться поправки.

Метод последовательных корректировок положения наиболее широко применим при использовании в качестве систем управления ПР цифровых вычислительных машин. В этом случае алгоритм управления по вектору скорости формулируется как приращение координат манипуляционной системы за один цикл вычисления алгоритма:

$$\Delta \vec{S} \approx J(q) \Delta \vec{q},$$

где  $J(q)$  — матрица Якоби, зависящая от фактической конфигурации манипуляционной системы ПР в рассматриваемый момент времени;  $\Delta \vec{S}$  — командный вектор приращений положения рабочего органа, задаваемый на уровне планирования его движения;  $\Delta \vec{q}$  — командный вектор приращений обобщенных координат манипуляционной системы, который служит управляющим сигналом для исполнительного уровня системы управления.

При реализации данного метода узловые точки на сложной траектории следует выбирать достаточно близко одна от другой с тем, чтобы переходы от одной точки к другой при планировании траектории движения не меняли необходимой картины последнего.

**Метод линейного программирования движения.** Изменение ранга матрицы Якоби на траектории, избыточность степеней подвижности ( $N > 6$ ) манипуляционной системы, наличие ограничений на координаты  $q$  не позволяют решать линейные уравнения, которыми система описывается, стандартными методами. Однако для заданной конфигурации манипуляционной системы все ограничения можно записать в виде линейных уравнений и неравенств с помощью метода линейного программирования [21]. Управление планированием траектории движения рабочих органов основано на использовании линейной модели и содержит следующие этапы:

определение текущих значений обобщенных координат  $q$  элементов манипуляционной системы и цели управления, задающей конечное положение  $S^* \in \mathbb{R}^n$ ;

вычисление текущего значения положения  $S^* \in \mathbb{R}^n$  и формирование командного вектора изменения этого положения  $\Delta \vec{S}$ , если цель управления еще не достигнута;

построение линейной модели: вычисление матрицы Якоби  $J$  и ограничений, зависящих от текущей конфигурации манипуляционной системы и состояния среды, с которой она взаимодействует;

определение командных приращений обобщенных координат  $\Delta q$  манипуляционной системы с помощью решения задачи линейного программирования;

передача управляющих величин  $\Delta q$  на исполнительный уровень управления и возвращение к первому этапу.

Управление манипуляционными системами ПР с помощью решения задач линейного программирования эффективно при наличии избыточности степеней подвижности и необходимости учета ограничений на координаты. Если же число степеней подвижности манипуляционной системы недостаточно для выполнения заданного движения, такое управление автоматически определяет приближенное решение, минимизирующее ошибку.

**Приближенные методы.** При синтезе системы управления ПР по вектору скорости пользуются приближенными решениями, которые вытекают из ограниченности задания значений координат. Обычно берут по три значения координат (два крайних и одно среднее) и для них вычисляют обратную матрицу  $J^{-1}$ . Для всех же других значений координат (в том числе и для узловых, характерных точек траектории) обратная матрица вычисляется интерполированием. Именно поэтому такие методы управления называют приближенными и возникающие при интерполяции ошибки часто не имеют большого значения, особенно в системах управлений, замкнутых по положению. Если использо-

вать решение  $\dot{q} = DJ^T\bar{\omega}$ , отпадает необходимость обращения матрицы  $J$ . В приведенном выражении  $D$  — диагональная матрица с неотрицательными элементами, а операция обращения заменена операцией транспонирования. Смысл управления заключается в том, что рабочий орган движется по вектору скорости  $\bar{\omega}_T$ , имеющему неотрицательную проекцию на командный вектор  $\bar{\omega}$ , т. е.  $\bar{\omega}_T^T \bar{\omega} \geq 0$ . Во многих случаях, особенно при наличии обратной связи по положению, выполнения этого условия оказывается вполне достаточно для достижения конечной цели управления.

**Метод динамического программирования** требует точного решения обратной задачи в узловых точках и оказывается наиболее эффективным для класса кинематических схем манипуляционных систем, когда обратная задача может быть решена в конечном виде аналитически. Трудности решения обратной задачи заключаются в неоднозначности обратного преобразования шестимерного рабочего пространства в пространство обобщенных координат в допустимой области изменения последних, в том числе и для структур с числом степеней подвижности  $N = 6$ . Это объясняется тем, что одному и тому же положению рабочего органа манипуляционной системы может соответствовать множество ее конфигураций (под конфигурацией понимается вектор значений обобщенных координат степеней подвижностей). В отличие от обратной, в прямой задаче положение рабочего органа однозначно определяется конфигурацией манипуляционной системы. Для манипуляционной системы с шестью степенями подвижности решение обратной задачи можно получить непосредственно из геометрических соотношений [56] или с привлечением матричных методов [27].

Метод динамического программирования заключается в следующем. На начальном этапе процесса планирования решается обратная задача для заданной последовательности  $\{S(c)\}$  или  $\{T_s(c)\}$ ,  $c = 1, \dots, N$ , состояний ЗУ в рабочей зоне ПР. В результате получают последовательность  $\{Q_c\}$ ,  $c = 1, \dots, N$ , множеств допустимых конфигураций манипуляционной системы, где

$$Q_c = \{q_i(c) : S(c) = f[q_i(c)]\}, i \in g_i;$$

$g_i$  — целочисленное множество индексов  $i$  допустимых конфигураций  $q_i(c)$  для  $c$ -й узловой точки траектории. Допустимой считается такая конфигурация, для которой значения обобщенных координат удовлетворяют конструктивным ограничениям на пределы их изменения:

$$q_{k \min} \leq q_k \leq q_{k \max}, k = 1, \dots, M.$$

Если некоторые из значений обобщенных координат не могут быть определены, состояния (конфигурации) манипуляционной системы считаются вырожденными. Поэтому значения обобщенных координат, которые не определены, полагают равными их значениям в предыдущей узловой точке  $Q_{c-1}$ , так что каждое из множеств  $Q_c$  будет содержать при этом конечное число элементов. Траектория исполнительного органа в конечном итоге будет представлять собой последовательность переходов из одной узловой конфигурации в другую, а задача сводится к выбору показателя оптимальности (энергетический, временной или учитывающий другие факторы).

### 3. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ДИНАМИКА МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПР

Манипуляционная система робота обрабатывает транспортные и ориентирующие движения, заданные программой на программноносителе или формируемые на основании данных информационной системы ПР. Положение объекта, зависящее от совокупного состояния звеньев манипуляционной системы робота (см. рис. 4.5), определяется положением точки  $S$ , т. е. вектором  $\vec{r}$ , характеризующим это положение. Поэтому задачей кинематического анализа манипуляционной системы робота является описание характеристик перемещения, скоростей и ускорений звеньев ПР как взаимосвязанной совокупности твердых тел в трехмерном пространстве. Для удобства и упрощения организации управления ПР желательно, чтобы это описание базировалось на единых принципах, которые могут быть использованы и при решении задач управления роботом и обработки информации. В промышленной робототехнике этим целям в наибольшей мере отвечает метод однородных координат точек трехмерного пространства, основанный на использовании математического аппарата преобразования матриц размером  $4 \times 4$  [56], обеспечивающего определение однородных координат точки, линии, плоскости и их описание в трехмерном пространстве.

Однородными координатами точки  $S$  в трехмерном пространстве являются любые четыре числа  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , не все одновременно равные

нулю и связанные с ее декартовыми координатами  $X, Y$  и  $Z$  уравнениями

$$x = x_1/x_4; y = x_2/x_4; z = x_3/x_4,$$

которые являются характеристикой однородности только при  $x_4 \neq 0$ . Если  $x_4 = 0$ , то точка пространства, соответствующая четырем числам  $x_1, x_2, x_3$  и 0, может быть бесконечно удалена в направлении вектора  $\vec{r} = (bx_1, bx_2, bx_3)$ ,  $b \neq 0$ . Тогда точки с координатами  $(1, 0, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0, 0)$ ,  $(0, 0, 1, 0)$  бесконечно удалены от соответствующих осей  $x, y, z$ , а точка с координатами  $(0, 0, 0, 1)$  соответствует началу системы координат.

Уравнение вида

$$dx_1 + ex_2 + fx_3 + gx_4 = 0$$

описывает плоскость в пространстве, которая бесконечно удалена при  $d = e = f = 0$ .

Два независимых уравнения

$$dx_1 + ex_2 + fx_3 + gx_4 = 0;$$

$$d_1x_1 + e_1x_2 + f_1x_3 + g_1x_4 = 0$$

определяют прямую, которая бесконечно удалена при  $d/d_1 = e/e_1 = f/f_1$ .

Операции над векторами в однородных координатах выполняются по тем же формулам, что и в декартовых, а именно:

длина вектора  $|\vec{r}| = \sqrt{d^2 + e^2 + f^2 + g^2} / |f|$ ;

сложение и вычитание векторов  $\vec{r}_1 = [d, e, f, g]$  и  $\vec{r}_2 = [d_1, e_1, f_1, g_1]$  дает результирующий вектор

$$\vec{r}_p = \left[ \left( \frac{d}{g} \pm \frac{d_1}{g_1} \right), \left( \frac{e}{g} \pm \frac{e_1}{g_1} \right), \left( \frac{f}{g} \pm \frac{f_1}{g_1} \right), 1 \right];$$

умножение вектора  $\vec{r} = [d, e, f, g]$  на скаляр  $\rho$ , т. е.  $\vec{r}\rho = [d, e, f, g/\rho]$ ;

скалярное и векторное произведения двух векторов  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  имеет, соответственно, вид

$$r_c = r_1 r_2 = (dd_1 + ee_1 + ff_1)/gg_1;$$

$$\vec{r}_v = \vec{r}_1 \vec{r}_2 = [(ef_1 - fe_1), (fd_1 - df_1), (de_1 - d_1e), gg_1].$$

Если заданы декартовы координаты точки в одной, например, подвижной системе координат  $ox'y'z'$ , то можно перейти к описанию положения этой точки в другой (например, базовой) системе координат  $oxyz$  по следующим формулам преобразования

$$x = \delta_1 x' + \delta_2 y' + \delta_3 z' + r_1;$$

$$y = h_1 x' + h_2 y' + h_3 z' + r_2;$$

$$z = k_1 x' + k_2 y' + k_3 z' + r_3,$$

где  $r_1, r_2, r_3$  — координаты начала отсчета подвижной системы координат  $ox'y'z'$  в базовой системе  $oxyz$ ;  $\delta_1, h_1, k_1, \dots, \delta_3, h_3, k_3$  — направляющие косинусы углов между осями подвижной и базовой координатных систем.

При переходе к однородным координатам формула преобразования принимает вид

$$x_1 = \delta_1 x'_1 + \delta_2 x'_2 + \delta_3 x'_3 + r_1 x'_4; x_2 = h_1 x'_1 + h_2 x'_2 + h_3 x'_3 + r_2 x'_4; \\ x_3 = k_1 x'_1 + k_2 x'_2 + k_3 x'_3 + r_3 x'_4; x_4 = \dots \dots \dots x'_4,$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и  $x'_1, x'_2, x'_3, x'_4$  — однородные координаты точки соответственно в неподвижной и подвижной системах координат.

Матрица однородного преобразования, которым связаны однородные точки в подвижной и неподвижной системах координат, представляет собой таблицу коэффициентов системы выражений, описывающих положение точки в однородных координатах:

$$T = \begin{vmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & r_1 \\ h_1 & h_2 & h_3 & r_2 \\ k_1 & k_2 & k_3 & r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Как видно, таблица матрицы  $T$  преобразования включает коэффициенты параметров, характеризующих линейное (переносное) перемещение и угловое вращение в однородных координатах, т. е. эту матрицу можно представить как декомпозицию перемещения и вращения:

$$T = T_L \times T_\theta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 1 & 0 & r_2 \\ 0 & 0 & 1 & r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & 0 \\ h_1 & h_2 & h_3 & 0 \\ k_1 & k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Матричное представление движения вращения относительно координатных осей определяется соответствующими таблицами коэффициентов:

$$T_{ax} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & -\cos \theta_x \end{vmatrix}; \quad T_{ay} = \begin{vmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{vmatrix}; \\ T_{az} = \begin{vmatrix} \cos \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ 0 & \cos \theta_z & 1 \end{vmatrix},$$

где  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  — углы поворота относительно соответствующих координатных осей.

Любые два последовательных звена  $c$  и  $c + 1$  (см. рис. 4.5), связанных с базовой и подвижной системами координат, образуют кинематическую пару пятого класса, обеспечивая в относительном движении поступательное, вращательное вдоль оси расположения базового звена  $c$  и вращательное (перпендикулярно к этой оси) перемещение. При этом относительное перемещение в кинематической паре определяется одним параметром — углом относительного поворота или линейной величиной относительного смещения. Однако манипуляционная система робота представляет собой, как правило, кинематическую

цепь последовательно соединенных звеньев, число которых больше двух. Поэтому каждое звено  $c = 1, 2, \dots, N$  образует кинематическую пару как со звеном  $c-1$ , так и со звеном  $c+1$ . В этом случае условия связей относительно положений звеньев записываются рекуррентно:

$$T_c = T_{c-1} A_{c, c-1}(q_c), \quad c = 1, 2, \dots, N,$$

где  $(4 \times 4)$  — матрица пересчета  $A_{c, c-1} = T_{c-1}^{-1} T_c$  — имеет ту же структуру, что и матрица  $T$ , и определяет положение звена  $c$  в  $c-1$ -й системе координат, причем матрицы  $A_{c, c-1}$  выражают отношения между системами координат звеньев, а матрицы  $T$  (матрицы преобразования звеньев) определяют положение и ориентацию каждого звена в пространстве; параметры  $q_c$  определяют относительные перемещения звеньев в кинематических парах 5-го класса и являются обобщенными координатами манипуляционной системы ПР. Важно, чтобы число параметров, входящих в матрицы  $A_{c, c-1}$ , было минимальным и достаточно полно определяло взаиморасположение звеньев кинематической пары, а вид этой матрицы был одинаков как для поступательных, так и для вращательных пар (для манипуляционной системы ПР, представленной на рис. 4.5, параметры  $q_c \in \{\alpha, \theta, S_z, \varphi, \gamma, \beta\}$ ).

В задачах теории манипуляционных систем широко используется метод взаимосвязанного представления координат [56, 68]. Метод заключается в следующем. Пусть  $c+1$  и  $c$  — две координатные системы (или два звена манипуляционной системы робота, связанные с этими координатными системами). Ставится задача совмещения координатных систем (или связанных с ними звеньев), которая может быть интерпретирована как преобразование системы координат  $c$  в систему координат  $c+1$ . Последнее достигается вращением, двумя переносами и снова вращением системы координат  $c+1$  в следующем порядке: вращение относительно оси  $Z_c$  на угол  $\theta_{z(c+1)}$  до обеспечения параллельности осей  $X_c$  и  $X_{c+1}$ ; перенос вдоль оси  $Z_c$  на величину  $t_{z(c+1)}$  до совмещения начала координат системы координат  $c+1$  с точкой пересечения оси  $Z_c$  общим перпендикуляром, проведенным к осям  $Z_c$  и  $Z_{c+1}$ ; перенос вдоль оси  $X_{c+1}$  на величину  $t_{x(c+1)}$ , обеспечивающий совмещение начал систем координат; вращение относительно оси  $X_{c+1}$  на угол  $\theta_{x(c+1)}$  до совмещения всех осей. Переменной величиной для сочленений с вращательным движением является угол  $\theta$ , а для пар с поступательным перемещением — относительное смещение  $t$ .

Каждому из перечисленных движений соответствует матрица преобразования

$$A_{c, c+1}^{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{z(c+1)} & -\sin \theta_{z(c+1)} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{z(c+1)} & \cos \theta_{z(c+1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{c, c+1}^{t_z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_{z(c+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{c, c+1}^{t_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_{x(c+1)} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_{c, c+1}^{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{x(c+1)} & -\sin \theta_{x(c+1)} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{x(c+1)} & \cos \theta_{x(c+1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перемножая матрицы, соответствующие элементарным движениям при совмещении систем координат, получаем итоговую матрицу  $A_c$ , связывающую эти системы:

$$A_c = A_{c, c+1}^{\theta_z} A_{c, c+1}^{t_z} A_{c, c+1}^{t_x} A_{c, c+1}^{\theta_x} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \theta_{z(c+1)}; -\sin \theta_{z(c+1)} \cos \theta_{x(c+1)}; \sin \theta_{z(c+1)} \sin \theta_{x(c+1)}; t_{x(c+1)} \cos \theta_{z(c+1)} \\ \sin \theta_{z(c+1)}; \cos \theta_{z(c+1)} \cos \theta_{x(c+1)}; -\cos \theta_{z(c+1)} \sin \theta_{x(c+1)}; t_{x(c+1)} \sin \theta_{z(c+1)} \\ 0; \sin \theta_{x(c+1)}; \cos \theta_{x(c+1)}; t_{z(c+1)} \\ 0; 0; 0; 1 \end{bmatrix}.$$

Переходя к начальной (абсолютной)  $oxyz$  и конечной  $ox'y'z'$  системам координат (см. рис. 4.5), положение и ориентацию ЗУ или рабочего органа ПР относительно начальной системы координат для стационарного ПР описываем соотношением

$$T_{x'y'z'} = T_0 \prod_{c=1}^N A_c,$$

где  $T_0$  — единичная матрица.

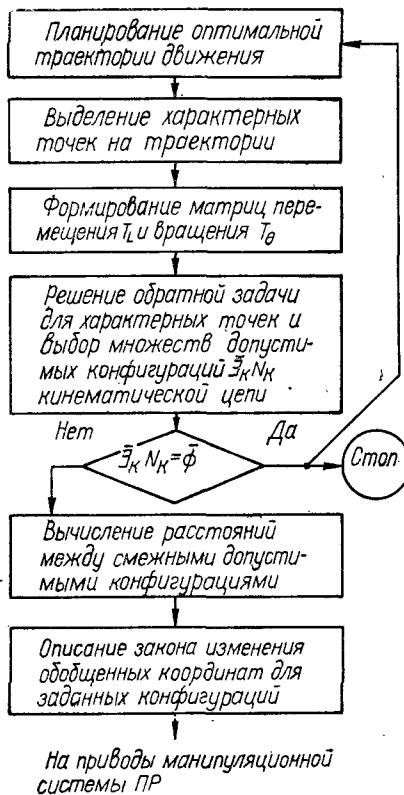
Если же матрица  $T_0$  характеризует положение системы координат подвижного робота в некоторой другой системе координат (например, обслуживаемого технологического оборудования), то в этом случае матрица имеет вид  $T$ -матрицы.

Геометрический смысл матрицы захватного устройства ПР определяется ее структурой, у которой первые три столбца характеризуют направления координатных осей  $X'$ ,  $Y'$  и  $Z'$ , а четвертый — вектор  $\vec{r}$  положения начала отсчета системы координат  $OX$  захватного устройства (на рис. 4.5 — полюс  $S$ ) в начальной системе координат  $OXYZ$  манипуляционной системы ПР. Кроме того, второй и третий столбцы представляют собой соответственно векторы ориентации и подхода ЗУ к объекту захвата.

С помощью матричного представления положения рабочих органов манипуляционной системы можно решить прямую задачу — управление ориентирующими и транспортными движениями рабочих органов при известных структуре, компоновке манипуляционной системы и ограничениях в рабочей зоне.

Часто, особенно при проектировании РТК и выборе технических средств (включая ПР), входящих в комплекс, необходимо решить обратную задачу: определить структуру и компоновку манипуляционной системы робота, с помощью которых можно реализовать совокуп-

ность и последовательность движений рабочих органов с учетом имеющихся ограничений в рабочей зоне, т. е. обратная задача о положении состоит в определении значений шести обобщенных координат руки, с тем, чтобы привести исполнительный механизм в такое состояние, в котором захватный орган будет иметь положение и ориентацию, соответствующие заданной матрице  $T_{x'y'z'}$ .



При решении обратной задачи линейное и угловое положения отдельных звеньев манипуляционной системы робота могут быть определены графически с учетом ограничений на кинематические звенья. Процедура синтеза структуры манипуляционной системы при этом сводится к следующему. Определяется оптимальная траектория движения рабочего органа ПР от момента загрузки (захвата) до момента выдачи объекта манипулирования в ориентированном положении на позиции разгрузки и выделяются характерные точки этой траектории. В каждой характерной точке формируются матрицы перемещения  $T_L$  и вращения  $T_\theta$ . Затем для каждой выбранной точки траектории решается обратная задача — формируется матрица обобщенных координат, позволяющая определить (выбрать) вид кинематического соединения и конфигурацию кинематической цепи (например, обеспе-

Рис. 4.8. Структурная схема алгоритма планирования траектории

чивающих траекторию наискорейшего действия с учетом заданных ограничений). Наконец, производится оптимизация траектории по динамическим параметрам (быстродействие, скорость и ускорение отдельных элементов кинематической цепи) манипуляционной системы и формирование управляющих сигналов во времени. Следует, однако, помнить, что все подвижные соединения системы, за исключением последнего, допускают относительные перемещения в ограниченных пределах, поэтому после всех вычислений необходимо убедиться, что полученное решение соответствует заданным ограничениям.

Структурная схема алгоритма планирования траектории манипуляционной системы ПР представляет набор безусловных и условного переходов (рис. 4.8). Условные переходы связаны с проверкой выполнения условий ограничений. Следует, однако, учитывать, что для опре-

деления обобщенных координат исполнительного механизма (манипуляционной системы по заданному положению рабочего органа ПР, т. е. по заданному значению матрицы  $T_{x'y'z'}$ , необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений, и при числе уравнений, более шести, применение для задач синтеза автоматизируемых алгоритмов затруднено.

Динамика манипуляционной системы определяется наличием обобщенных сил и моментов, скоростей и ускорений рабочих органов при изменении их положения в пространстве, кинетической и потенциальной энергиями системы и ее звеньев. Задачей динамического анализа манипуляционной системы робота является получение уравнений, связывающих ускорения и обобщенные силы, действующие в ней, а также планирование оптимальной траектории движения рабочих органов ПР по вектору скорости или вектору силы с применением одного из известных методов оптимизации (в частности, по условию минимума вектора-градиента).

Динамическую модель манипуляционной системы ПР можно получить с помощью того же метода описания, который использовался при проведении кинематического анализа. Следует, однако, придерживаться определенных правил дифференцирования по времени  $4 \times 4$ -матриц  $T_c$ ,  $c+1$ , так как именно при их изменении изменяются положения рабочих органов ПР в пространстве:  $\dot{T}_c = \Phi T_c \dot{q}_c$ .

Матрица  $\Phi$  является  $4 \times 4$ -матрицей, характеризующей тип соединения в кинематической цепи. В частности, принимая во внимание, что для ротационных  $b_p$  пар  $\Phi = \Phi_p$ , а для поступательных  $b_n$  пар  $\Phi = \Phi_n$ , легко перейти к матрице, характеризующей кинематическую цепь, обеспечивающую совокупное движение  $\Phi_b = b_p \Phi_p + b_n \Phi_n$ .

При этом можно выявить следующее свойство дифференцирования матрицы  $T_c$ : дифференцирование элементов матрицы  $T_c$  может быть заменено умножением этой матрицы на специальные матрицы, определяемые типом кинематической пары\*. Тогда условия связей относительно скоростей и ускорений записываются в следующем виде:

$$V_c = \dot{T}_c = T_{c-1} A_c + b_c \dot{q}_c;$$

$$a_c = \ddot{T}_c = \ddot{T}_{c-1} A_c + b_c \ddot{q}_c + k_c,$$

где  $b_c = T_{c-1} \Phi A_c$ ;  $k_c = 2 \dot{T}_{c-1} \Phi A_c \dot{q}_c + T_{c-1} \Phi^2 A_c \ddot{q}_c^2$ ;  $c = 1, 2, \dots, N$ .

Полученные выражения позволяют представить скорости изменения положения любого звена через скорости обобщенных координат

$$V_c = \dot{T}_c = \sum_{i=1}^c D_{ci} \dot{q}_i,$$

где  $D_{ci} = T_0 A_1 A_2 \dots A_{i-1} \Phi A_i \dots A_c$ .

\* Условимся под матрицей  $\Phi$  без индекса понимать любой из типов подвижных соединений, обеспечивающих ротационное, поступательное или совокупное (в частном случае, при  $b_p = 1$  и  $b_n = \pm h/2\pi$  — винтовое, где  $h$  — шаг винта) движение.

Можно определить также ускорения звеньев через скорости и ускорения обобщенных координат:

$$a_c = \ddot{T}_c = \sum_{i=1}^c D_{ci} + \sum_{i=1}^c \sum_{n=1}^c D_{cin} \dot{q}_i \dot{q}_n,$$

где  $D_{cin} = T_0 A_1 A_2 \dots \Phi A_i \dots \Phi A_n \dots A_c$ .

Все вышеприведенные рассуждения относятся к стационарным манипуляционным системам ПР. Если же основание ПР подвижно, либо имеется подвесной подвижный манипулятор, в зависимости скоростей и ускорений звеньев, определенные через скорости и ускорения обобщенных координат, добавляются дополнительные слагаемые.

Для записи уравнений движения и определения полной кинетической и потенциальной энергии  $c$ -го звена вводится понятие обобщенных сил [56]. Для их определения воспользуемся следующими рассуждениями. Пусть действующие силы с учетом сил тяжести и моменты, приложенные к рабочему органу манипуляционной системы ПР, в системе координат  $c$ -го звена имеют вид

$$F_c = \begin{bmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \\ F_{cz} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad M_c = \begin{bmatrix} M_{ix} \\ M_{iy} \\ M_{iz} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

После приведения силы и момента к системе координат рабочего органа ПР получим выражения

$$F_{x'y'z'} = T_{x'y'z'}^{-1} F_c; \quad M_{x'y'z'} = T_{x'y'z'}^{-1} M_c.$$

Аналогично силу и момент можно привести к системе координат предшествующих звеньев кинематической цепи манипуляционной системы

$$F_{c-1} = A_c F_{x'y'z'} = A_c T_{x'y'z'}^{-1} F_c; \\ M_{c-1} = A_c M_{x'y'z'} = A_c T_{x'y'z'}^{-1} M_c.$$

Поскольку в общем случае вектор сил  $F_{c-1}$  может не проходить через начало  $c-1$ -й системы координат, возникает дополнительный момент  $M_d = R_c F_{c-1}$ , где  $R_c$  — правый столбец матрицы  $A_c$ . Тогда с учетом дополнительного момента общий момент, действующий на сочленение,

$$M_{c-1} = A_c M_c + R_c F_{c-1}.$$

В случае, если  $c-1$ -е соединение относится к вращательным, моментом реакции является  $M_{c-1, x, y, z}$ ; для поступательных соединений силой реакции будет  $F_{c-1, x, y, z}$ . Эти шесть реакций и представляют собой обобщенные силы.

Полученные выражения для сил и моментов (в том числе для обобщенных сил) позволяют рассчитать действующие в каждом сочленении манипуляционной системы силы с учетом сил тяжести звеньев.

Уравнение движения можно получить из условия, связывающего кинетическую и потенциальную энергии манипуляционной системы в обобщенной системе координат:

$$d/dt (\partial L / \partial \dot{q}_i) - \partial L / \partial q_i = F_i,$$

где  $F_i$  — обобщенная сила, отнесенная к  $i$ -му подвижному соединению;  $L$  — функция Лагранжа;  $q_i$  — обобщенные координаты.

Выразив бесконечно малую массу некоторой точки с координатами  $Q_c$  в звене  $c$  через  $dm$ , запишем выражение для полной кинетической энергии  $c$ -го звена:

$$K_c = \frac{1}{2} \text{tr} \left[ V_c \left( \int Q_c Q_c^T dm \right) V_c^T \right],$$

где  $\int Q_c Q_c^T dm$  — инерция  $J_c$ , определяемая матрицей

$$J_c = \int Q_c Q_c^T dm = m_c \times \\ \times \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (r_{c11}^2 + r_{c22}^2 + r_{c33}^2) & r_{c12}^2 & r_{c13}^2 & x_c^M \\ r_{c12}^2 & \frac{1}{2} (r_{c11}^2 - r_{c22}^2 + r_{c33}^2) & r_{c23}^2 & y_c^M \\ r_{c13}^2 & r_{c23}^2 & \frac{1}{2} (r_{c11}^2 + r_{c22}^2 - r_{c33}^2) & z_c^M \\ x_c^M & y_c^M & z_c^M & 1 \end{bmatrix};$$

$r_{cin}$  — радиус инерции звена  $c$  относительно осей  $i$  и  $n$ ;  $Q_c^M = (x_c^M, y_c^M, z_c^M, 1)^T$  — координаты центра масс звена  $c$ ;  $m_c$  — масса  $c$ -го звена.

Инерционные свойства звеньев кинематической цепи как твердых тел определяются  $4 \times 4$ -матрицей

$$J_c = \begin{bmatrix} J_{xxc} & J_{xyc} & J_{xzc} & M_{xc} \\ J_{yxc} & J_{yyc} & J_{yzc} & M_{yc} \\ J_{zxc} & J_{zyc} & J_{zzc} & M_{zc} \\ M_{xc} & M_{yc} & M_{zc} & m_c \end{bmatrix},$$

где  $J_{xxc} = \sum m_c r_{1c}^2$ ;  $J_{yyc} = \sum m_c r_{2c}^2$ ;  $J_{zzc} = \sum m_c r_{3c}^2$  — центробежные моменты инерции;  $J_{xyc} = J_{yxc} = \sum m_c r_{1c} r_{2c}$ ;  $J_{xzc} = J_{zxc} = \sum m_c r_{1c} r_{3c}$ ;  $J_{yzc} = J_{zyc} = \sum m_c r_{2c} r_{3c}$  — моменты инерции относительно координатных плоскостей;  $M_{xc} = \sum m_c r_{1c}$ ;  $M_{yc} = \sum m_c r_{2c}$ ;  $M_{zc} = \sum m_c r_{3c}$  — статические моменты инерции;  $m_c = \sum m_c$  — масса звена.

Очевидно, эта матрица инерций не зависит от характера движения и содержит всю необходимую информацию о распределении масс в твердом теле относительно связанной системы координат. Суммарная кинетическая энергия всех звеньев манипуляционной системы

$$K = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^n \text{tr} (V_c J_c V_c^T),$$

где  $\text{tr}(V_c J_c V_c^T)$  — след матрицы  $A$ , т. е. линейная операция, с помощью которой можно вычислить сумму диагональных элементов квадратной матрицы.

Потенциальная энергия манипуляционной системы ПР определяется соотношением

$$P = - \sum_{c=1}^n m_c G^T T_c Q_c^M,$$

где  $G^T = (0, 0, g, 0)$ ;  $g$  — ускорение свободного падения. Конечный вид уравнений, необходимых для определения сил инерции и обобщенных сил, можно получить из выражений для суммарных кинетической и потенциальной энергий манипуляционной системы ПР после соответствующих преобразований и дифференцирования:

$$\sum_{i=c}^n \sum_{k=1}^i \text{tr}(D_{ik} J_c D_{ci}^T) \ddot{q}_k + \sum_{i=c}^n \sum_{k=1}^i \sum_{p=1}^i \text{tr}(D_{ikp} J_i D_{ci}^T) \times \\ \times \dot{q}_p \dot{q}_k - \sum_{i=c}^n m_i G^T D_{ci} Q_i^M = F_c.$$

#### 4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПР

В дальнейшем ПР будут совершенствоваться в трех направлениях: повышения информативности за счет разработки средств очувствления и оснащения ими роботов; улучшения статических и динамических характеристик за счет использования регулируемых приводов поступательных и ротационных движений, а также разработки качественно новых высокофункциональных исполнительных систем с так называемыми разгруженными конструкциями или с приводами на основании; расширения функциональной универсальности при повышении точности позиционирования за счет совершенствования конструкций манипуляционных систем ПР.

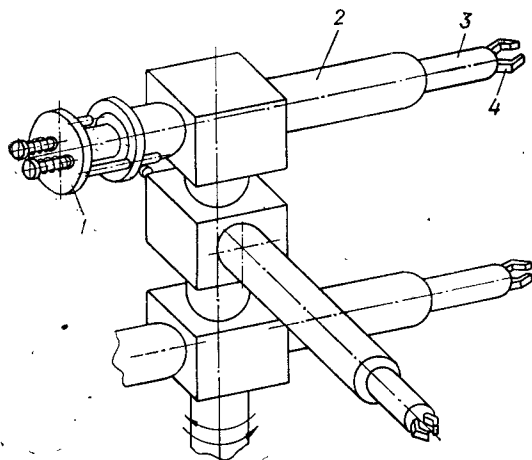


Рис. 4.9. Многорукий манипулятор

Ниже приводятся некоторые оригинальные и эффективные конструкции исполнительных устройств и манипуляционных систем, дающих представление об особенностях третьего направления совершенствования ПР.

В *многоруком манипуляторе* (рис. 4.9), предназначенном для одновременного захвата, передачи и установки нескольких деталей, использованы своеобразные упоры, ограничивающие перемещения его рук, образованных пневмоцилиндрами 2. Эти упоры гасят кинетическую энергию не всего подвижного звена — штока 3, несущего захватное устройство 4, а лишь небольшого по массе диска 1, служащего заслонкой смонтированного в штоке пневматического усилителя. Тем самым резко снижаются перегрузки манипулятора и его отдельных элементов, повышается качество его работы и точность позиционирования захватного устройства. Особенностью манипулятора является также то, что шток служит преобразователем, который не только отрабатывает управляющие команды, но и вырабатывает эти команды, что позволяет упростить всю конструкцию и сделать ее более компактной.

Исполнительное устройство показано на рис. 4.10 и содержит пневмоцилиндр двухстороннего действия, в котором расположен поршень 7 с симметричным штоком 5. На правом конце штока установлено ЗУ 6, на левом торце имеется фланец 13, несущий два направляющих стержня 1, по которым может двигаться заслонка 15, прижимаемая к торцу штока пружинами 2. Заслонка закрывает выходное сопло 14, установленное по осевому отверстию 10 штока.

При работе манипулятора сжатый воздух (при некоторой модификации манипулятора это может быть жидкость, например, масло) поступает через входы  $a$  и  $b$  из питающей магистрали в обе полости цилиндра, причем давление  $P_a$ , поступающее через вход  $a$ , больше давления  $P_b$ , поступающего через вход  $b$ . Поскольку выходное сопло 14 закрыто заслонкой, поршень и шток с захватом движутся слева направо, перемещая деталь на заданную позицию.

В некоторый момент времени заслонка набегает на упоры 12, и заслонка 15 останавливается, открывая сопло 14. Поэтому воздух из левой полости цилиндра через отверстия 9 и 10, а также через сопло стравливается в атмосферу, и давление в этой полости начинает падать, уравниваясь с давлением в правой полости.

Давление в левой полости, являющейся проточной камерой, зависит от величины  $S$  зазора между соплом и заслонкой. Поскольку зазор по мере перемещения штока вправо увеличивается, давление в левой полости падает, и наступает момент, когда оно уравнивается с давлением воздуха в правой полости. В таком положении поршень и шток останавливаются, причем захватное устройство располагается над рабочей позицией. Если из-за инерции шток перебежит заданное ему положение, зазор  $S$  станет больше требуемого. Истечение воздуха через сопло 14 станет больше, а давление в левой полости уменьшится. Тем самым разбаланс давлений в обеих полостях цилиндра изменит

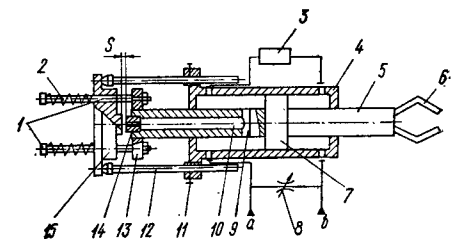


Рис. 4.10. Рука манипулятора с пневматическим упором

свое направление, и возникнет сила, смещающая поршень 7 со штоком в обратную сторону. Таким образом, исполнительное устройство всегда устанавливается в заданном положении.

После выполнения рабочей операции исполнительное устройство отводится назад, для чего воздух из левой полости цилиндра 4 стравливается. Тогда под действием давления в правой полости поршень со штоком **отходит** назад до упора в левый торец цилиндра. При ходе штока назад зазор *S* закрывается. Манипулятор готов к следующему циклу работы.

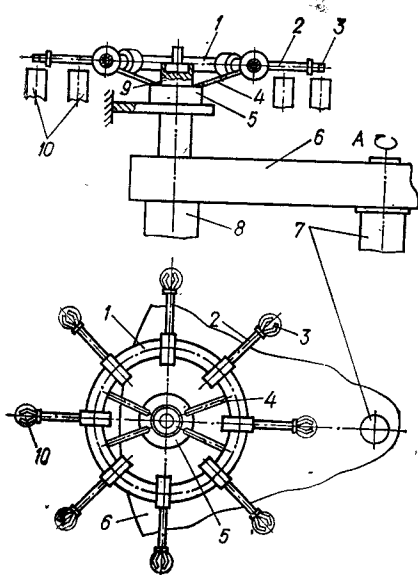


Рис. 4.11. Многорукий манипулятор на кольцевом основании

Для улучшения динамических характеристик обе питающие цилиндр линии соединены друг с другом посредством дросселя 8, что позволяет исключить возможность возникновения автоколебаний поршня и штока.

Если необходимо перемещать ЗУ в одном направлении на несколько шагов, упоры должны быть выполнены убирающимися и управляться отдельными приводами, например, электромагнитными. Кроме того, упоры могут быть оснащены механизмами шаговой подачи и изменять самостоятельно свое положение на манипуляторе.

**Многорукий манипулятор**, обеспечивающий передачу на одну рабочую позицию нескольких деталей с разных исходных позиций [35] (рис. 4.11), смонтирован на кольцевом основании, представляющем собой полую трубу 1, закрепленную на платформе 5 с помощью стержней 4. На основание установлено восемь рук 2, каждая из которых взаимодействует с соответствующей исходной позицией 10. Через отверстие в основании проходит подвижный в вертикальном направлении вал 9, в верхней части которого оборудована рабочая — сборочная —

Чтобы исполнительное устройство могло выводиться на другую позицию, следует лишь переставить упоры, зафиксировав их в новых положениях винтами 11. Таким образом, это устройство не только обладает улучшенными динамическими характеристиками, но и позволяет выходить практически в любую точку рабочего пространства.

Между обеими полостями цилиндра расположен пневматический связанный с ними чувствительный элемент 3, измеряющий и сравнивающий давления с обеих сторон поршня. В тот момент, когда давления уравниваются (что свидетельствует о выведении захватного устройства в заданную точку), чувствительный элемент вырабатывает сигнал рабочему органу на отработку требуемого действия (например, ввести вал в отверстие сопрягаемой детали и т. п.). Для улучшения

позиция, оснащенная соответствующими ЗУ и фиксаторами. Вал 9 представляет собой шток гидропривода 8, укрепленного на поворотном столе 6 рабочего агрегата, совершающего периодические повороты вокруг своей оси 7 на заданный угол (в данном случае на угол 45°), происходящие по стрелке А.

В исходном положении все руки 2 с захватными устройствами 3 расположены так, как показано на рисунке, т. е. над исходными позициями 10. ЗУ одной из рук забирает очередную деталь, находящуюся на исходной позиции, и рука поворачивается на угол 180°, устанавливая деталь на рабочей позиции. Далее эта рука начинает вращаться в обратную сторону, и одновременно начинает вращение другая рука (расположенная, например, на противоположной стороне кольца 1), которая переносит и размещает на рабочей позиции свою деталь.

Когда первая рука вернется в исходное положение, вторая рука расположится над рабочей позицией, установив на ней свою деталь. Затем вторая рука отводится на исходную позицию, а третья рука начинает поворачиваться в сторону сборочной позиции и так до тех пор, пока не сработают все руки, подающие детали на рабочую позицию. После этого шток с рабочей позицией опускается вниз настолько, чтобы выйти из неподвижного основания.

Затем поворотный стол-диск поворачивается вокруг своей оси на заданный угол, и под основание подводится следующая рабочая позиция, расположенная на своем штоке. Далее повторяется процедура установки деталей уже на эту позицию.

Существенными преимуществами обладают манипуляторы, исполнительные устройства которых образуют собой замкнутые кинематические цепи. Один из таких манипуляторов показан на рис. 4.12. Он монтируется на стойке-основании 1 и включает два плеча 2 и 6, укрепленных на валах шаговых приводов 9 и 8 соответственно. Плечо 2 шарнирно соединено с предплечьем 4, несущим ЗУ 5. Плечо 6 также с помощью предплечья 7 связано шарнирно с предплечьем 4. Таким образом, данный манипулятор представляет собой систему с двумя степенями свободы, каждая из которых определяется вращением роторов двух приводных двигателей. Расположение шарнира 3, соединяющего оба предплечья 4 и 7, может быть различным: он может располагаться либо ближе к ЗУ 5, либо дальше от него. В первом случае достигается большая точность позиционирования ЗУ, во втором — большее быстроедействие манипулятора. Если же предплечье 7 продолжить далее за шарнир 3, то на нем также может быть установлено соответствующее ЗУ, и манипулятор из одорукого превращается в двурукий.

Рассмотренные конструкции исполнительных устройств позволяют создавать манипуляционные системы ПР, предназначенные для ши-

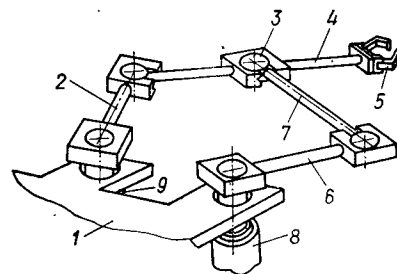


Рис. 4.12. Манипулятор со звеньями, образующими замкнутую цепь

рокого спектра работ, начиная от перестановки объектов (например, с конвейера на конвейер), загрузки технологического оборудования и кончая механосборочными операциями при изготовлении многоэлементных прецизионных изделий.

## Глава V

## ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

## 1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

В качестве исполнительных механизмов промышленных роботов используются гидравлические, пневматические, электрические и механические приводные устройства. Широко распространен *гидравлический привод* (до 37 % в общем объеме выпускаемых ПР), который обеспечивает высокую грузоподъемность ПР, возможность управления в широком диапазоне скоростей и ускорений при относительно невысоких эксплуатационных затратах. Максимальные транспортные скорости обеспечиваются *пневматическим приводом* (более 47 %), наиболее распространенном в моделях ПР с ограниченной грузоподъемностью. В последние годы возрастает удельный вес *электрических приводов* (более 14 %) в связи с разработкой высокомоментных и высокооборотных электродвигателей и линейных двигателей с использованием так называемых разгруженных конструкций ПР, в которых применяются электродвигатели. *Механические приводы* (до 2 %) используются, главным образом, в промышленных роботах, когда не требуется частая переналадка, а грузоподъемность ограничена при достаточно большом быстродействии манипулирования объектами.

При необходимости создания высокоточных линейных и угловых позиционеров все чаще применяется вибродвижная техника. Учитывая хорошие энергетические показатели вибродвигателей (незначительное потребление энергии, достаточная удельная мощность), их точностные характеристики, возможность дискретного управления при относительно хороших динамических характеристиках, можно считать эти двигатели одними из наиболее перспективных в робототехнике.

В тех случаях, когда исполнительный механизм соответствующего звена манипуляционной системы ПР используется для осуществления движения, имеющего стабильный, цикловой характер, применяются механические приводные устройства возвратно-поступательного или ротационного действия с программносителями, выполненными в виде профилированных кулачков или барабанов. Принцип действия таких устройств основан на преобразовании вращательного движения кулачка или барабана в возвратно-поступательное или кривошипно-вращательное движение передающих звеньев и далее — выходным звеньям манипуляционной системы ПР, чем обеспечивается необхо-

димое передаточное отношение и требуемый характер перемещения последних.

Для обеспечения ротационных движений колонны ПР широко используются спаренные механизмы возвратно-поступательных перемещений, которые через передаточные звенья — реечные, торсионные, ременные, цепные передачи — передают движение колонне, осуществляя одновременно преобразование возвратно-поступательного перемещения в возвратно-ротационное.

Широко распространены в качестве приводных устройств кисти ПР флажковые поворотные механизмы, которые могут иметь одно- и двухфлажковое исполнение ротора [35].

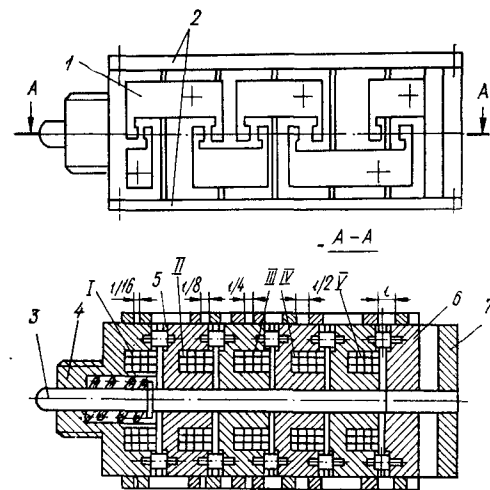


Рис. 5.1. Электромагнитный пятисекционный приводной модуль

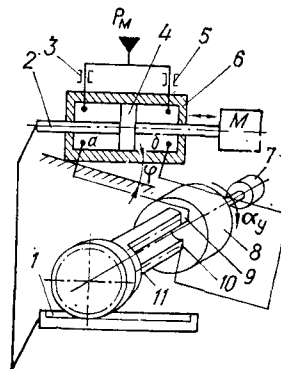


Рис. 5.2. Схема позиционного гидропривода

При обслуживании и выполнении сборочных операций возникает необходимость позиционирования рабочих органов ПР с дискретностью шага, составляющей доли миллиметра. В таких случаях задача решается за счет традиционных средств подготовки рабочей среды, что не всегда оказывается осуществимым и приводит к увеличению затрат на разработку и изготовление специальной технологической оснастки, накопителей и т. д.

Эту же задачу можно решить, повышая технологическую универсальность ПР за счет использования многофункциональных, в частности дискретных, исполнительных механизмов. К таким механизмам относится электромагнитный пятисекционный модуль дискретных линейных перемещений [42], работа которого основана на непосредственном суммировании ходов якорей электромагнитов. При стыковке модуля с основным дискретным приводом линейных перемещений он также может выполнять роль точного позиционера. Изображенный на рис. 5.1 модуль состоит из пяти секций, причем секция 4 неподвижна, а остальные секции перемещаются по толкателю 3, снабженному

пружиной. Перемещения секций ограничены упорами 1, 5 так, что значения их ходов двоячно взвешены и составляют для I секции 1/16, для II — 1/8, для III — 1/4, для IV — 1/2 и для V — 1. Включение любой из обмоток I, II, III, IV и V вызывает перемещение соседней секции (выполняющей функции якоря) из положения, при котором сомкнуты упоры 1, в положение, при котором сомкнуты упоры 5. Последние, кроме ограничения хода, обеспечивают зазор, способствующий четкому размыканию секций.

При включении любой из обмоток или их комбинации перемещаются соответствующие секции, а вместе с ними и толкатель 3, который упирается в заднюю крышку 6 модуля с усилием, обеспечиваемым пружиной. Стенка 7 неподвижна и служит направляющей при выдвигании толкателя, а крышка 6 перемещается на суммарную величину хода толкателя, обеспечиваемую комбинацией включения обмоток секций. При отключении питания обмоток толкатель возвращается в исходное положение. Для выравнивания усилия, развиваемого модулем в начале и конце хода секции, схема питания вырабатывает формирующий импульс.

Для предотвращения повреждений дискретный модуль устанавливается в корпусе 2. Точность позиционирования определяется точностью изготовления секций привода и может достигать  $\pm 0,05$  мм.

При автоматизации сборочных операций с силовым замыканием элементов сборки, а также при обслуживании объектов роботизации, имеющих большую массу, в машиностроении применяются ПР, исполнительные механизмы которых оснащены позиционным гидравлическим приводом.

Схема такого гидропривода с плоским золотником и реечной обратной связью изображена на рис. 5.2 [63]. В корпусе 6 гидроцилиндра перемещается поршень 4 с двухсторонним штоком 2, один конец которого является выходом и нагружен массой  $M$  манипулируемого объекта, а другой — жестко связан с рейкой 1 обратной связи. Для подвода рабочей жидкости в полости  $a$ ,  $b$  гидроцилиндра используются входные дроссели 3, 5; слив осуществляется через управляемый (например, шаговым ротационным двигателем ШРД) золотник 8. Дросселирование выполняется изменением проводимости сливных окон 9 и 10 золотника с помощью заслонки 11, связанной посредством реечной передачи 1 со штоком 2. Таким образом, в стационарном режиме входные дроссели и полуперекрываемые сливные окна золотника образуют находящийся в равновесии гидравлический мост. При задании входного воздействия в виде поворота золотника на угол  $\alpha_y$  с помощью шагового двигателя 7 одно из сливных окон золотника 8 полностью перекрывается, а другое — полностью открывается на слив. При этом равновесие моста нарушается, возникает перепад давлений в полостях  $a$  и  $b$  гидроцилиндра, и поршень с нагрузкой  $M$  приводится в движение. Это движение продолжается до тех пор, пока заслонка, вращаемая рейкой 1 обратной связи, не восстановит баланс гидравлического моста, перекрыв наполовину каждое из сливных отверстий.

Однако возможно возникновение перерегулирования, которое определяется позиционируемой нагрузкой и конструктивными параметра-

ми привода. Математическая модель такого привода включает систему уравнений, описывающих движение его выходного звена, расходы через полости гидроцилиндра, учитывающие сжимаемость рабочей жидкости, утечки в щелевых уплотнениях и перетечки по поршню из полости в полость, эффективные площади сливных окон, реечную обратную связь.

Уравнение движения штока, перемещающего инерционную нагрузку под углом  $\varphi$  к горизонтальной плоскости,

$$M_{\Sigma} \frac{d^2x}{dt^2} = S_{\Sigma} (P_1 - P_2) - \beta \frac{dx}{dt} - mg \sin \varphi, \quad (5.1)$$

где  $x$  — перемещение поршня;  $M_{\Sigma} = M_{\text{пр}} + M$  — суммарная масса движущихся элементов привода и нагрузки, приведенная к поршню;  $S_{\Sigma} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{п}}^2 - D_{\text{ш}}^2)$  — эффективная площадь поршня;  $D_{\text{п}}$ ,  $D_{\text{ш}}$  — диаметры поршня и штока;  $P_1$ ,  $P_2$  — текущие значения давления в полостях  $a$  и  $b$  цилиндра соответственно;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий суммарную силу вязкого трения и трение в сопряжениях поршень — гильза цилиндра и шток — втулка в уплотнениях.

Балансирование гидравлического моста предполагает попарную идентичность входных дросселей и сливных окон по конструктивным параметрам. Тогда уравнения расходов через полости гидроцилиндра с учетом перечисленных ранее ограничений принимают вид

$$\begin{aligned} V_a \xi \frac{dP_1}{dt} &= \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} (S_1 \sqrt{P_{\text{м}} - P_1} - S_{21} \sqrt{P_1}) - S_{\Sigma} \frac{dx}{dt} - \\ &\quad - K_1 (P_1 - P_2) - K_2 P_1; \\ V_b \xi \frac{dP_2}{dt} &= \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} (S_1 \sqrt{P_{\text{м}} - P_1} - S_{22} \sqrt{P_2}) + S_{\Sigma} \frac{dx}{dt} + \\ &\quad + K_1 (P_1 - P_2) - K_2 P_2, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где  $V_a$ ,  $V_b$  — текущие значения объемов полостей  $a$  и  $b$ ;  $\xi$ ,  $\rho$  — коэффициент сжимаемости и плотность рабочей жидкости;  $P_{\text{м}}$  — давление в магистрали;  $\mu$  — коэффициент расхода входных дросселей и сливных окон;  $K_1$ ,  $K_2$  — коэффициенты, учитывающие перетечки рабочего тела из полостей на слив;  $S_1$  — эффективная площадь входных дросселей;  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  — эффективные площади сливных окон, причем

$$S_{21}(\alpha_y) = S_{22}(-\alpha_y). \quad (5.3)$$

Уравнение реечной обратной связи

$$\alpha_{0.c} = 2x/zm, \quad (5.4)$$

где  $z$  — число зубьев шестерни полукольцевой заслонки;  $m$  — модуль реечного зацепления.

Математическая модель (5.1) — (5.4) с учетом нелинейной зависимости эффективной площади сливных окон от положения полукольцевой заслонки, а также значения коэффициента  $\beta = \eta \frac{F}{h}$  ( $\eta$  — динамический коэффициент вязкости жидкости;  $F$  — площадь поверхностей

контакта;  $h$  — радиальный зазор) могут быть использованы при выборе конструктивных параметров привода, обеспечивающих максимальные скорости и точность позиционирования рабочих органов манипуляционной системы ПР при манипулировании объектами значительной массы.

Несмотря на ряд достоинств гидроприводов, их использование в промышленной робототехнике ограничено из-за значительных затрат на обслуживание, требующее высококвалифицированной рабочей силы и наличия разветвленных гидромагистралей. В связи с этим в ближайшее десятилетие основным приводом останется пневматический с расширением удельного веса электропривода. Однако и применение пневмопривода с аналоговой системой управления ограничено

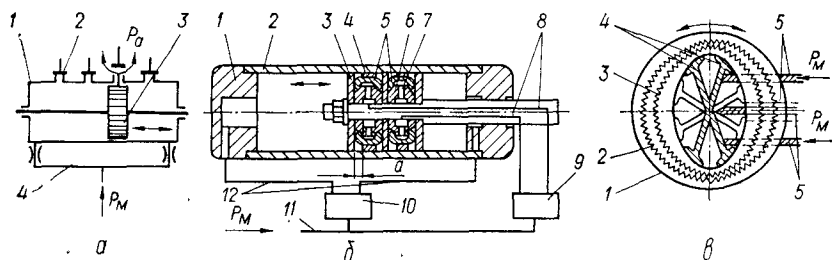


Рис. 5.3. Пневматические позиционеры с проточными полостями (а); импульсный (б) и волновой (в)

в связи с тем, что высокая точность и быстродействие в них обеспечивается за счет существенного усложнения структуры и соответствующего удорожания всей системы. Поэтому более широкое распространение получают пневмоприводы с импульсными системами управления, в том числе шагового типа.

Особое место среди позиционных приводов, перспективных для промышленной робототехники, занимают пневмоприводы с позиционированием без упоров [35, 36]. К их достоинствам относится простота конструктивного исполнения, сочетающаяся с простотой управления такими приводами. Отсутствие упоров повышает надежность работы привода и увеличивает общее быстродействие.

Позиционер с проточными полостями изображен на рис. 5.3, а. Точность отработки заданной координаты определяется геометрией отводных каналов, характеристиками сил трения и другими факторами. При снижении сил трения в таком пневмоприводе возможны автоколебания. Привод состоит из корпуса 1, заслонок-клапанов 2, которые для увеличения числа точек позиционирования могут быть расположены вдоль корпуса 1 на расстоянии, регламентируемом конструктивными параметрами поршня. Для уменьшения шага дискретности, заслонки-клапаны можно располагать по винтовой линии корпуса. При открытии одной из заслонок сжатый воздух под давлением  $P_M$  подается из магистрали по каналам 4 через входные дроссели, регулирующие скорость перемещения исполнительного штока в обе полости корпуса 1. Однако давление в обеих полостях будет определяться состоянием

заслонок-клапанов, и в той полости, где заслонка открыта по команде системы управления, происходит утечка рабочего тела в атмосферу и создается пониженное, по сравнению с противоположной полостью, давление. При этом поршень 3 будет перемещаться в направлении полости с пониженным давлением до тех пор, пока не перекроет своей торцевой поверхностью отверстие, которое при открытой заслонке соединяет полость с атмосферой. После завершения переходного процесса шток пневмоцилиндра устанавливается в запрограммированную позицию. При этом равенство давлений в обеих полостях цилиндра восстанавливается.

Явление сжимаемости воздуха приводит к тому, что изменение давлений в полостях пневмопривода запаздывает по отношению к моменту переключения распределительных устройств. Поэтому при относительно простом алгоритме управления точность и стабильность отработки позиций в рассмотренном приводе невысоки. Для снижения влияния сжимаемости воздуха уменьшают быстродействие привода или усложняют алгоритм и соответственно систему управления, вводят дополнительные тормозящие системы, обратную связь и др.

Пневмопривод, работающий как обычный пневмоцилиндр и как шаговый двигатель, управляемый импульсными пневматическими сигналами, показан на рис. 5.3, б. Пневмоцилиндр 2 с крышками 1 по краям содержит шток с внутренними каналами 8 и составной поршень. Каждая из двух одинаковых секций этого поршня расположена между двумя дисками 3, жестко связанными со штоком. В секцию входит эластичное кольцо 5 С-образного профиля (материал — резина, фосфористая бронза и т. п.), фрикционное кольцо 4 из твердой резины и корпус-кольцо 6, удерживающий края кольца 5. Между корпусом-кольцом и эластичным кольцом каждой секции образуется камера 7, связанная через каналы 8 в штоке с распределителем 9, работающим в импульсном режиме.

В зависимости от того, сообщается ли камера 7 с атмосферой или магистралью, фрикционное кольцо 4 не касается внутренней поверхности цилиндра 2 или прижато к ней давлением воздуха  $P_M$ . Во втором случае поршень может переместиться только на шаг  $a$ ; при этом боковой зазор между соответствующим диском 3 и фрикционным кольцом 4 выбирается, что обеспечивается деформацией эластичного кольца 5. Шаговый режим движения поршня реализуется поочередным сообщением камер 7 с атмосферой и магистралью (в противофазе по отношению друг к другу): сначала первая секция неподвижна, а вторая смещается по отношению к ней на шаг  $a$ , а затем, после подачи давления во вторую секцию, она становится неподвижной, а первая секция сообщается с атмосферой и перемещается в сторону второй на шаг  $a$ . При реверсе очередность сообщения секций с магистралью и атмосферой меняется.

При одновременном сообщении обеих камер 7 с атмосферой пневмопривод работает как обычный пневмоцилиндр, управляемый распределителем 10, который подает воздух под давлением  $P_M$  по каналам 12 в требуемую по программе полость пневмоцилиндра. По каналу 11 рабочее тело подается к распределителям 9, 10. При комбинации обоих режимов реализуется быстрый подвод рабочего органа пневмопривода

в зону заданной позиции с последующим выходом на нее в шаговом режиме с высокой точностью позиционирования.

В последние годы все больше применяются в промышленной робототехнике шаговые пневмоприводы с волновой передачей, обеспечивающей компактность конструкции привода, высокий КПД и возможность изменения передаточного отношения в большом диапазоне. Такой пневмопривод (рис. 5.3, а) серийно выпускается фирмой «Ротэлл» (Великобритания). В состав привода входит жесткое кольцо 1 с зубцами 2, эластичное кольцо 3 с зубцами такого же профиля, камеры 4 и каналы 5 подвода воздуха из магистрали  $P_M$ . В результате последовательного подключения эластичных камер 4, равномерно расположенных по окружности внутри эластичного кольца 3, к атмосфере и магистрали возникает бегущая волна деформации гибкого кольца 3. За один оборот волны деформации выходной вал пневмопривода поворачивается на один угловой шаг (один зуб). Частота импульсов управления изменяется в пределах от нескольких импульсов в минуту до нескольких сотен импульсов в секунду. Преимущества таких приводов — высокая точность отработки шага без накопленной ошибки.

## 2. МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ГИДРОПНЕВМОПРИВОДЫ

Расширение функций ПР в значительной мере обеспечивается использованием многопозиционных (многопоршневых) пневмо- и гидроприводов. При этом удастся совместить в одном исполнительном устройстве высокую точность позиционирования и возможность обслуживания многономенклатурного производства без существенных затрат времени на перекомпоновку РТК.

Цифровой позиционный привод с внутренним расположением [3]  $n$  поршней 2, находящихся в зацеплении между собой (ход  $i$ -го поршня в два раза превышает ход  $i-1$ -го), показан на рис. 5.4, а. Число дискретных положений такого привода равно 2, а дискретность составляет величину  $l$  хода штока второй секции, определяемого конструктивными характеристиками полости первой секции. Привод воспринимает  $n$ -разрядные параллельные двоичные входные сигналы. Последний ( $n$ -й) поршень выполнен совместно со штоком, и штоковая полость соединена с магистралью противодействия, которое служит для возврата поршней привода в исходное положение при снятии входных сигналов. Управляющее устройство содержит каналы  $b$  и  $в$  подвода, сообщенные с продольным отверстием  $a$  в корпусе 1 цилиндра, а также каналы  $г$  отвода рабочего тела из поршневых полостей. Кроме того, в управляющее устройство входят эластичные заслонки 3, установленные в продольных отверстиях, и прижимы 4, связанные механической передачей в виде рычагов 10 с запорными клапанами 8 распределителей 9. Поршни выполнены в виде стержней 7 с дисками 6 на торцах.

Работа привода заключается в следующем. Рабочее тело, (например, сжатый воздух) подается в отверстие  $a$ . При подаче управляющего сигнала на один или несколько распределителей 9 их запорные клапаны 8 открывают каналы  $г$  отвода и посредством рычагов 10 воздействуют на соответствующие прижимы 4, которые прижимают эластичную

заслонку 3 к соответствующим каналам  $б$  подвода, перекрывая их. При отсутствии управляющего сигнала на распределителе 9 эластичная заслонка 3 под действием давления рабочего тела деформируется и отжимает прижим 4 от канала  $б$  подвода. Прижим 4 через рычаг 10

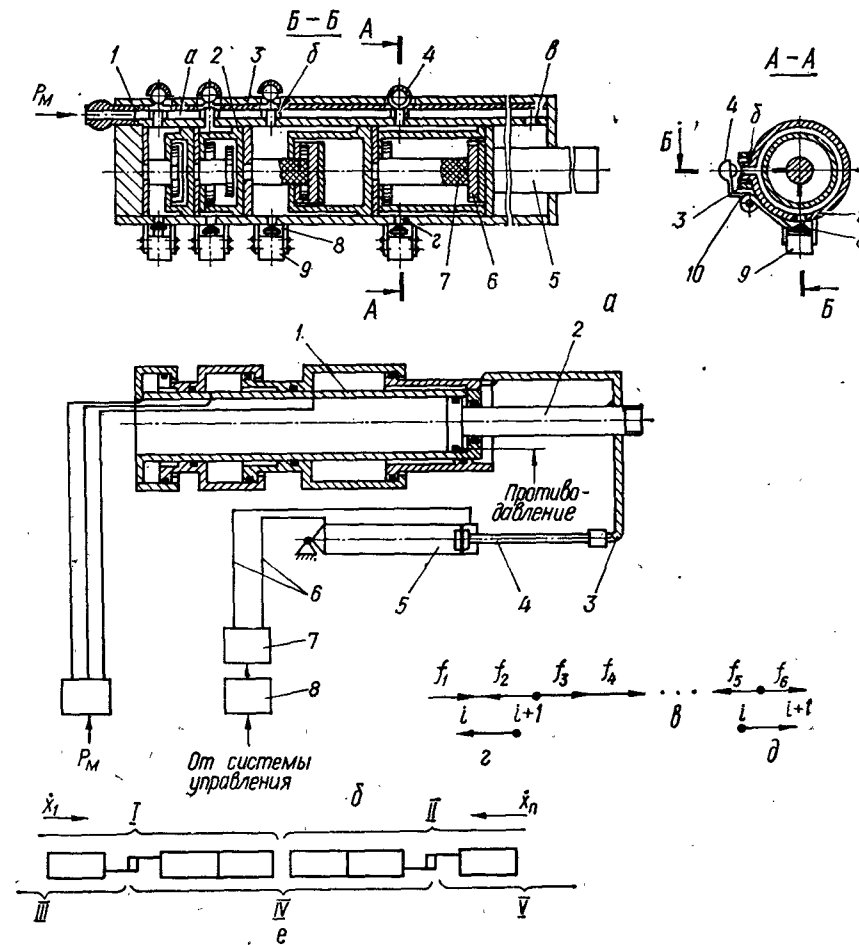


Рис. 5.4. Цифровой позиционный привод (а), схема привода с внешним демпфером (б), график сил сцепления в звеньях (в) с устойчивой (г) и неустойчивой (д) связью и состояние поршней при соударении (е)

воздействует на запорный клапан 8, который закрывает канал  $г$  отвода. Тем самым обеспечивается одновременное открытие каналов подвода и перекрытие соответствующих каналов отвода при отсутствии управляющих сигналов на распределителе, а также одновременное закрытие каналов подвода и открытие соответствующих каналов отвода при подаче управляющих сигналов. Величина перемещения выходного штока 5 зависит от комбинации двоичных сигналов на распре-

делителях 9. В общем случае для  $n$ -секционного привода максимальное перемещение  $L$  выходного штока  $L_x = \sum_{i=1}^n l_i = (2^n - 1)l$ , где  $l$  — дискретность привода.

Второй разновидностью цифрового гидропневмопривода является *привод с внешним расположением поршней* [10], что делает привод технологичным при сборке. На рис. 5.4, б изображен цифровой гидропневмопривод, у которого демпфирующее устройство вынесено за его габариты.

Работа привода заключается в следующем. Координаты позиционирования и момент начала демпфирования заранее программируются в системе управления. При подаче рабочего тела из магистрали  $P_m$  в секцию (секции) гидропневмодвигателя 1 шток 2, перемещаясь (например, вправо) увлекает за собой через связь 3 шток 4 демпфера. Управляемый источник 7 электрического поля обесточен, сообщаемым каналом 6 обеспечивается рабочая скорость штока 2. При достижении штоком 2 критического положения, обусловленного программой координаты позиционирования и моментом начала демпфирования (формируется датчиком предельных положений, например, сопло — заслонка, или герконами), в блоке программного управления устройства 8 формируется требуемый закон нарастания напряжения, которое поступает на управляемый источник электрического поля 7. Под действием этого поля изменяется вязкость жидкости рабочего тела с электрореологическим эффектом в сечении канала, где расположен источник 7. При этом сужается проходное сечение канала 6 и уменьшается скорость перетекания рабочего тела из правой в левую полость цилиндра демпфера 5.

В программном управляющем устройстве 8 закон нарастания напряжения формируется таким образом, чтобы обеспечить плавное (либо дискретное) снижение рабочей скорости перемещения штока 2 до ползучей, а затем и до полной остановки его в заданной программой координате. После окончания торможения обесточивается источник 7 электрического поля и восстанавливаются начальные свойства жидкого рабочего тела, т. е. подготавливаются условия для перемещения штока 2 на рабочей скорости в новую координату, предусмотренную программой, в том числе и реверсирование.

При необходимости аналогично описанному может формироваться закон управления разгоном штока 2 до рабочего значения скорости на начальных этапах движения. Математическая модель такого привода представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени давлений в полостях управления и движение поршней. В основу динамического расчета таких приводов может быть положена гипотеза об устойчивой группе поршней, под которой понимается совокупность находящихся в контакте друг с другом и в данный момент времени движущихся как одно целое (под действием внешних к данной совокупности сил) поршней. Устойчивая группа в течение переходного процесса может видоизменяться в результате изменения внутренних (между элементами группы) и внеш-

них сил, а также в результате соударения отдельных устойчивых групп. При этом могут образовываться новые устойчивые группы [40].

Исходя из допущения о наличии устойчивости группы поршней, находим ускорение звеньев группы

$$a_x = \sum_{i=1}^n F_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (5.5)$$

и уравнение движения  $i$ -го звена этой группы

$$m_i a_i = F_i + f_i - f_{i-1}. \quad (5.6)$$

Здесь  $F_i$  — результирующая внешняя сила, действующая на  $i$ -е звено, без учета сил взаимодействия между звеньями;  $f_i$  — сила, действующая на  $i$ -е звено со стороны  $i + 1$ -го звена;  $m_i$  — масса  $i$ -го звена.

Поскольку группа звеньев устойчива, следует  $a_x \equiv a_i$ . Из уравнения (5.6) получаем

$$f_i = a m_i - F_i + f_{i-1}. \quad (5.7)$$

Выражение (5.7) определяет итерационный процесс вычисления сил в звеньях, находящихся в зацеплении. При этом порядок взаимодействия этих сил в выражении (5.7) может быть представлен в виде орграфа сил сцепления в звеньях (рис. 5.4, в). Дуга, связывающая  $i$ -ю и  $i + 1$ -ю вершины, по направлению совпадает с силой, действующей на  $i$ -е звено со стороны  $i + 1$ -го звена. Назовем связью первого рода связь между сжимаемыми звеньями, а второго рода — между растягиваемыми звеньями. При этом должно быть четко оговорено положительное направление графа. Так, если считать положительным направление слева направо, устойчивая связь для звеньев первого рода будет такой, как это показано на рис. 5.4, г, а неустойчивая — на рис. 5.4, д. И наоборот, для звеньев второго рода устойчивую связь иллюстрирует рис. 5.4, д, а неустойчивую — рис. 5.4, г.

Если в графе рис. 5.4, в все дуги имеют направление, совпадающее с устойчивым направлением для данного рода звеньев, такая группа является устойчивой. Если же имеется хотя одна дуга, соответствующая неустойчивой связи, данная группа неустойчива, и для описания необходимо разбить группы на несколько устойчивых, причем членение следует проводить, разрывая неустойчивые связи. При этом число разорванных связей может отличаться от количества неустойчивых связей графа на рис. 5.4, г.

В основе алгоритма выделения устойчивых групп лежит поиск в группе максимально неустойчивой связи и разрыве ее при образовании двух групп, каждая из которых затем проверяется на устойчивость. Для определения максимально неустойчивой связи воспользуемся следующими преобразованиями. Найдем ускорение группы I —  $i$ -е звено при наличии  $i$ -й связи:

$$a_x = (\sum_{k=1}^i F_k + f_i) / \sum_{k=1}^i m_k. \quad (5.8)$$

Из выражений (5.7) и (5.8) определим первую связь

$$f_1 = \frac{\sum_{k=1}^i F_k + f_i}{\sum_{k=1}^i m_k} m_1 - F_1. \quad (5.9)$$

Ускорение группы I —  $i$ -е звено с разорванной  $i$ -й связью

$$a_1 = \sum_{k=1}^i F_k / \sum_{k=1}^i m_k.$$

В этом случае первая связь характеризуется силой

$$f'_1 = \left( \sum_{k=1}^i F_k / \sum_{k=1}^i m_k \right) m_1 - F_1.$$

Тогда изменение первой связи, вызванное разрывом  $i$ -й связи,

$$\Delta f_1 = f_1 - f'_1 = \frac{\sum_{k=1}^i F_k + f_i}{\sum_{k=1}^i m_k} m_1 - F_1 - \left( \sum_{k=1}^i F_k / \sum_{k=1}^i m_k \right) m_1 + F_1 = f_i \frac{m_1}{\sum_{k=1}^i m_k}.$$

Предположим, что описанный подход справедлив для  $j$ -го звена. Используя зависимости (5.7) и (5.8), записываем выражение для  $j$ -й связи в неразорванной группе:

$$f_j = \frac{\sum_{k=1}^i F_k - f_i}{\sum_{k=1}^i m_k} m_j - F_j + f_{i-1}. \quad (5.10)$$

Из выражений (5.7), (5.8) и (5.10) находим  $j$ -ю связь в разорванной цепи:

$$f'_j = \frac{\sum_{k=1}^i F_k}{\sum_{k=1}^i m_k} m_j - F_j + f_{i-1} - f_i \frac{\sum_{k=1}^{j-1} m_k}{\sum_{k=1}^i m_k}.$$

Следовательно,

$$\Delta f_j = f_j - f'_j = f_i \frac{\sum_{k=1}^{j-1} m_k}{\sum_{k=1}^i m_k}.$$

В результате проведенного анализа групп связей можно сделать следующие выводы: разрыв в любой связи ведет к изменению всех

связей цепи на величину, меньшую разорванной связи и совпадающую с ней по направлению; разрыв произвольной неустойчивой связи не может устранить неустойчивости связи, большей по модулю, чем разорванная, и совпадающей с ней по направлению; разрыв неустойчивой связи может привести к образованию новой неустойчивой связи другого рода.

При разработке математической модели привода следует учитывать, что работа последнего сопровождается соударениями устойчивых групп поршней. В соответствии с делением связей и звеньев на связи и звенья первого и второго рода, соударением первого рода принято называть такое, которое приводит к образованию связи первого рода; соударение второго рода — такое, которое приводит к образованию связи второго рода. Соударения первого рода групп I и II иллюстрируются рис. 5.4, е. При соударении первого рода двух групп элементов образуется новая группа, состоящая из элементов, связанных связью первого рода и не отделенных от места соударения связями второго рода (т. е. в месте соударения образуется новая связь, а в ближайших связях второго рода с обеих сторон от места соударения происходит разрыв). В результате образуются группы III—V. При соударении второго рода в месте соударения образуется новая связь, а в ближайших связях первого рода с обеих сторон от места соударения происходит разрыв.

Предположим, что соударение поршней является неупругим, скорость всех  $i$  элементов вновь образованной группы при соударении любого рода

$$\dot{X} = \frac{\sum_{k=1}^i (m_k \dot{X}_k)}{\sum_{k=1}^i m_k}.$$

Если произошло соударение, каждая из вновь образованных групп должна проверяться на устойчивость по приведенному ранее алгоритму

Для расчета переходных характеристик привода применяется численное интегрирование системы дифференциальных уравнений отдельных групп, которые в пределах шага интегрирования (как правило, достаточно малого промежутка времени) движутся как одно целое. Это упрощение справедливо, так как любой метод интегрирования — итерационный процесс, где за одну итерацию время изменяется на заранее определенную величину — шаг. Алгоритм расчета предусматривает синтезирование после каждого шага интегрирования заново системы дифференциальных уравнений, причем результаты предыдущего шага интегрирования являются начальными условиями для последующего.

Исходными данными расчета являются геометрические характеристики цифрового привода и начальные условия (входной набор поршней и данные по исходному их состоянию). По этим условиям определяются рабочие камеры, в которых произошло изменение входного набора, а также записывается уравнение, отображающее изменение давления:

$$dp/dt = f(\dot{X}_i, X_i, P_i),$$

где  $\dot{X}_i, X_i$  — скорость и линейная координата  $i$ -го поршня;  $P_i$  — давление в  $i$ -й камере;  $t$  — текущее время.

После каждого шага интегрирования определяется устойчивая группа поршней. Для каждой устойчивой  $j$ -й группы, содержащей  $i$  поршней, дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$d^2 X_j / dt^2 = F_j / m_j.$$

Вычисление значений  $F_j, m_j$  не вызывает затруднений, так как сила  $F_j$ , действующая на группу, пропорциональна перепаду давлений на этой группе и площади поршня, а  $m_j = \sum_{k=1}^i m_k$ . Так как количество устойчивых групп поршней обычно в любой момент времени значительно меньше общего числа поршней в приводе, процесс расчета значительно ускорится.

### 3. ЦИФРОВЫЕ ПОВОРОТНЫЕ ПНЕВМОПРИВОДЫ

Флажковые ротационные механизмы, которые в технической литературе известны также под названием поворотных моментных цилиндров, отличаются простотой конструктивного исполнения, технологичны в изготовлении и сборке, обеспечивают высокую точность углового позиционирования вала ротора. Именно последняя положительная особенность предопределила интерес разработчиков ПР к данному классу ротационных механизмов. Вместе с тем стремление расширить технологическую и функциональную универсальность ПР без существенного снижения других основных характеристик, в частности надежности функционирования, быстродействия, точности позиционирования рабочих органов, а для процессов сборки многоэлементных соединений — дискретности позиционирования (как линейного, так и углового) рабочих органов, привело к созданию цифровых ротационных приводов, аналогичных по принципу действия цифровым линейным приводам, но выполненных на элементной базе, за основу которой взят ротационный флажковый механизм [35]. Процессы, характеризующие работу такого привода, могут быть рассмотрены из его математической модели, для чего удобно воспользоваться обобщенной схемой цифрового многосекционного ротационного привода (рис. 5.5) [32]. Цифровой ротационный привод состоит из нескольких секций — флажковых ротационных механизмов, соединенных последовательно так, что выходной вал предыдущего привода вращает корпус последующего. Дискретность поворота выходного вала 4 последней секции определяется возможностями (диапазоном) ротации вала 1 первой секции, которые в изображенном приводе задаются предельными значениями угла  $\alpha_1$  поворота вала 1. Если в основе увеличения углового хода валов последующих секций принята геометрическая прогрессия с основанием 2, то вторая секция конструктивно выполнена таким образом, чтобы обеспечить предельные значения угла поворота вала 2 вдвое большие, чем для вала 1, т. е.  $\alpha_2 = 2\alpha_1$ . Соответственно, в третьей секции обеспечивается ротация вала 3 на угол  $\alpha_3 = 2\alpha_2 = 4\alpha_1$

и т. д. Тогда угол поворота  $n$ -й секции  $\alpha_n = 2^{n-1}\alpha_1$ , а суммарный угол поворота выходного вала, обеспечиваемый приводом при одно-временной работе всех секций,

$$\alpha_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i = (2^n - 1)\alpha_1.$$

Комбинируя подачу рабочего тела  $P_1, P_2, \dots, P_n$  в секции, можно получить  $2^n$  различных положений выходного вала. В частности, изображенный на рис. 5.5 привод обеспечивает восемь угловых координат позиционирования выходного вала 4. Возврат (реверс) секций при-

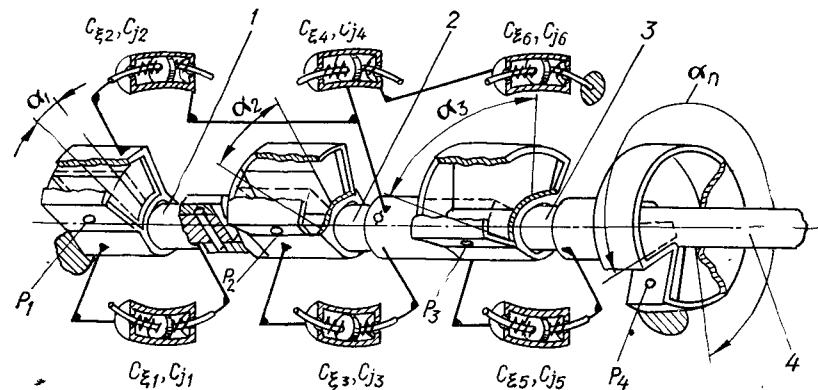


Рис. 5.5. Обобщенная схема цифрового ротационного привода

вода, не участвующих в обеспечении требуемого угла поворота выходного вала, в исходное положение, осуществляется созданием постоянного и противоположно направленного момента четвертой секции с рабочим давлением  $P_4$  в ее полости, обеспечивающим половину крутящего момента, развиваемого нижними секциями. При этом выходной вал 4 соединен с валом 3 третьей секции.

Динамика цифрового привода определяется силовыми факторами, действующими на его подвижные части, а также протекающими в камерах секций термодинамическими процессами и комбинацией включения поворотных камер. Поэтому математическая модель цифрового ротационного привода представляет собой систему уравнений, описывающую движение и соударение флажков, изменение температуры и давления в полостях секций.

При описании динамики привода можно положить коэффициенты  $c_{ei}$  демпфирования и  $c_{fi}$  упругости связей секций между собой постоянными. Кроме того, движение флажка отдельной секции нельзя рассматривать независимо от положения и скорости ротации других секций, следовательно, должны быть учтены изменение суммарного момента инерции, движущие моменты, моменты сил сопротивления и демпфирующие. Поэтому для описания движения отдельной секции вводятся логические коэффициенты, принимающие значения 0 или 1 в зависи-

мости от действующих в данный момент времени на секцию крутящих моментов, обусловленных связностью секций привода. Получено уравнение движения  $z$ -й лопасти для цифрового ротационного привода, содержащего  $n$  секций [22, 32]:

$$\frac{d^2\alpha_n}{dt^2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n j_i R_{1i}^z} \left[ \sum_{i=1}^z P_i S_{ii} r_i R_{2i}^z - \sum_{i=z+1}^{n+1} P_i S_{i-1} r_i R_{2i}^z + M_{\tau z} + M_{\kappa z} \right], \quad (5.11)$$

где  $M_{\tau z}$  и  $M_{\kappa z}$  — суммарный момент трения и суммарный крутящий момент;  $R_{1i}^z$  — логический коэффициент, учитывающий моменты инерции флажков, движущихся совместно с  $z$ -м флажком, причем

$$R_{1i}^z = 1 \text{ при } \{[(i > z) \wedge (\dot{\alpha}_z = \dot{\alpha}_{z+1} = \dots = \dot{\alpha}_i) \wedge (\ddot{\alpha}_z = \ddot{\alpha}_{z+1} = \dots = \ddot{\alpha}_i)] \vee [(i < z) \wedge (\dot{\alpha}_i = \dot{\alpha}_{i+1} = \dots = \dot{\alpha}_z) \wedge (\ddot{\alpha}_i = \ddot{\alpha}_{i+1} = \dots = \ddot{\alpha}_z)]\};$$

$R_{2i}^z$  — логический коэффициент, учитывающий давление в полостях, действующее на группу совместно двигающихся флажков, в которую входит  $z$ -й флажок, причем

$$R_{2i}^z = 1 \text{ при } [(R_{1i}^z = 1) \wedge (R_{1(i-1)}^z \neq 1) \wedge (i < z)] \vee \vee [(R_{1(i-1)}^z = 1) \wedge (R_{1i}^z \neq 1) \wedge (i > z)];$$

$\alpha_z, \dot{\alpha}_z, \ddot{\alpha}_z$  — угол ротации, угловая скорость и угловое ускорение  $Z$ -го флажка соответственно;  $n$  — количество подвижных секций;  $Z$  — номер секции, для которой составляется уравнение;  $i, m$  — номера секций, флажки которых соответственно входят и не входят в группу флажков, вращающихся совместно с  $Z$ -м;  $j_i$  — момент инерции  $i$ -го флажка;  $p_i$  — давление в полости  $i$ -й секции;  $S_{ii}$  — площадь боковой поверхности  $i$ -го флажка со стороны  $i$ -й секции;  $r_i$  — средний радиус полости  $i$ -й секции;

Суммарный крутящий момент  $M_{\kappa z}$  содержит логические коэффициенты  $R_{1im}^z$ , учитывающие крутящие моменты, возникающие при взаимодействии флажков и приложенные к группе, в которую входит  $z$ -й флажок, а также логические коэффициенты  $L_{im}$  и  $D_{im}$ , показывающие начало действия крутящего момента, создаваемого упругими связями и вязкими свойствами демпферов при взаимодействии  $i$ -го и  $m$ -го флажков. При этом

$$L_{im} = 1 \text{ при } [(\alpha_i - \alpha_m \leq \Delta\alpha_{im}^I)] \vee [(\alpha_i - \alpha_m \geq \Delta\alpha_{im}^{II}); \\ D_{im} = 1 \text{ при } [(\alpha_i - \alpha_m \leq \Delta\alpha_{im}^{III})] \vee [(\alpha_i - \alpha_m \geq \Delta\alpha_{im}^{IV}),$$

где  $\Delta\alpha_{im}^I, \Delta\alpha_{im}^{II}$  и  $\Delta\alpha_{im}^{III}, \Delta\alpha_{im}^{IV}$  — углы между  $i$ -м и  $m$ -м флажками, при которых начинают действовать, соответственно, крутящие моменты  $M_{\kappa}$  от жесткости и демпфирования.

Суммарный момент трения содержит логические коэффициенты  $H_{im}$ , учитывающие направление момента сил трения, приложенные к  $i$ -му флажку со стороны  $m$ -го:

$$H_{im} = \begin{cases} 1 & \text{при } \dot{\alpha}_i < \dot{\alpha}_m \\ 0 & \text{при } \dot{\alpha}_i = \dot{\alpha}_m \\ -1 & \text{при } \dot{\alpha}_i > \dot{\alpha}_m. \end{cases}$$

В основу математической модели термодинамических процессов в приводе положены уравнения следующего вида [36, 55]:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\beta}{V_{0i} + \sum_V M_{iV}} [\rho (M_{im} N_i + M_{ia1} \bar{N}_i + \\ + M_{ia2} - Q_{ia1} \bar{N}_i - Q_{ia2} - Q_{im} N_i) - p_i \sum_V \dot{M}_{iV}], \quad (5.12)$$

где  $\beta$  — показатель адиабаты;  $\rho$  — термодинамический коэффициент;  $N_i$  — логический коэффициент (равен единице, если давление подано в полость  $i$ -й секции, и нулю, если последняя соединена с атмосферой);  $V_{0i}$  — начальный объем полости  $i$ -й секции, включая объем трубопроводов;  $M_{im}$  — оператор поступления воздуха через золотник из магистрали;  $M_{ia1}, M_{ia2}$  — операторы поступления воздуха из атмосферы соответственно через золотник и зазоры;  $Q_{ia1}, Q_{ia2}$  — операторы расхода воздуха в атмосферу соответственно через золотник и зазоры;  $Q_{im}$  — оператор расхода воздуха через золотник в магистраль;

$$\sum_V \dot{M}_{iV} = (S_{ii} \dot{\alpha}_i - S_{(i-1)i} \dot{\alpha}_{(i-1)}) r_i$$

— оператор скорости изменения объема.

Операторы  $M_{a1}, M_{a2}$  поступления воздуха из атмосферы в полость секции, а также оператор расхода  $Q_{im}$  из полости секции в магистраль позволяют учесть явления нестационарности давления в полости секций при ударе флажков. Как и в случае цифровых линейных пневмоприводов, используются понятия группы (две или несколько последовательно расположенных секций, подвижные элементы которых имеют равные угловую скорость и ускорение), подгруппы (комбинации соседних секций, принадлежащих одной и той же группе) и ускорение отрыва группы (подгруппы отрываются, если они имеют разные ускорения отрыва и возможность ротации друг относительно друга).

Уравнение, описывающее изменение температуры в полостях секций, имеет вид

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{T}{p_i (V_{0i} + \sum_V M_{iV})} \left[ p_i \sum_V \dot{M}_{iV} + \frac{dp_i}{dt} (V_{0i} + \sum_V M_{iV}) - \right. \\ \left. - \rho \left( T_i \frac{M_{im} N_i + M_{ia1} \bar{N}_i + M_{ia2}}{T_m} - Q_{ia1} N_i - Q_{ia2} - Q_{im} N_i \right) \right], \quad (5.13)$$

где  $T_i$  — температура в полости  $i$ -й секции.

Таким образом, математическая модель цифрового ротационного привода описывается системой уравнений (5.11), (5.12), (5.13), решение которой возможно одним из численных методов. При этом уточняются основные параметры привода и оптимизируется их кинематическая структура и элементы конструкции.

#### 4. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВИБРАЦИОННЫЕ ПРИВОДЫ

Новые возможности открываются в робототехнике с использованием высокочастотных вибрационных преобразователей движения, или вибродвигателей [18]. К достоинствам вибродвигателей относятся такие характеристики, как высокая разрешающая способность

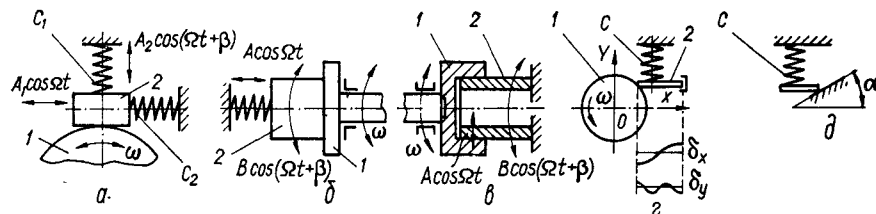


Рис. 5.6. Вибрационные приводы со взаимно-перпендикулярными продольными (а), продольно-крутильными (б), радиально-крутильными (в) колебаниями активного элемента и с однокомпонентными преобразователями продольных (г) и касательных (д) колебаний

по перемещению, широкий температурный диапазон, отсутствие влияния паразитных электрических или магнитных полей, а также хорошие динамические свойства в переходном режиме движения (пуск, остановка, шаговые режимы), так как виброэлемент с момента отключения питания становится тормозящим. Эти характеристики вибродвигателей позволяют создавать прецизионные микророботы, манипулирующие объектами небольшой массы с очень высокой точностью, что имеет место, в частности, при сборке сложных схем микроэлектроники.

Принцип действия вибродвигателей аналогичен принципу действия общего класса механизмов преобразования колебаний в движение, но с той разницей, что для последних предельной областью рабочих частот являются низкие (до 1 кГц), а для вибродвигателей — области высоких (более 20 кГц) частот; амплитуды колебаний преобразователей лежат в диапазоне  $0,1 \cdot 10^{-3}$  мм для тихоходных и 0,1 мм — для быстроходных устройств.

Вибрационный привод, изображенный на рис. 5.6, а, представляет собой колеблющееся звено 2, выполненное на упругих подвесках с жесткостью  $C_1$  и  $C_2$ , так что образуется колебательная система с сосредоточенными параметрами и двумя степенями свободы. Двумерное движение колеблющегося звена 2 определяет нормальную и тангенциальную составляющие скорости удара при неподвижном роторе 1. Сдвиг по фазе  $\beta$  гармонических колебаний звена 2 по соответствующим степеням свободы обеспечивает необходимую для приведения во вращение со скоростью  $\omega$  ротора 1 последовательность возвратно-посту-

пательных движений звена 2, а соотношение  $C_2 > C_1$  определяет характер взаимодействия элементов 1 и 2 вибродвигателя. Длительность взаимодействия зависит от параметров  $A_1$  и  $A_2$  и частоты  $\Omega$  колебаний звена 2.

Двумерное движение активного элемента — колеблющегося звена 2 — может формироваться не только совокупностью продольных колебаний по взаимно перпендикулярным осям, но и любой комбинацией продольных, поперечных, радиальных, изгибных, крутильных и сдвиговых колебаний. Так, на рис. 5.6, б показана схема, поясняющая принцип работы вибродвигателя ротационного действия с продольно-крутильными колебаниями активного элемента 2. Продольные колебания с частотой  $\Omega$  и амплитудой  $A$  обеспечивают нормальную составляющую скорости удара, а крутильные колебания с амплитудой  $B$  и частотой  $\Omega$  — тангенциальную составляющую. Совокупное действие обоих колебаний должно обеспечить вращение со скоростью  $\omega$  ротора 1 в требуемом направлении, что достигается сдвигом  $\beta$  по фазе обоих колебаний.

У вибродвигателя, изображенного на рис. 5.6, в, активный элемент 2 совершает радиально-крутильные колебания, причем радиальные колебания с амплитудой  $A$  и частотой  $\Omega$  обеспечивают нормальную составляющую ударного импульса, а крутильные колебания с амплитудой  $B$  подкрутки и частотой  $\Omega$  — тангенциальную составляющую. Как и в предыдущих двух схемах, синхронизация действия этих двух составляющих на ротор 1 обеспечивается сдвигом  $\beta$  по фазе колебаний. Взаимодействие элементов 1 и 2 может осуществляться как по внутренней поверхности полого ротора (как показано на схеме), так и с внешним зацеплением ротора.

Двумерные колебания в зоне контакта могут возбуждаться однокомпонентными преобразователями продольных колебаний активного звена 2 (рис. 5.6, г). Вторая составляющая колебаний в зоне контакта возникает благодаря изгибным колебаниям элемента 2 в плоскости  $XOY$ , которые возбуждаются проекцией ударного импульса на ось  $Y$ . Для обеспечения максимальных скоростей  $\omega$  вращения ротора 1 необходимо выполнение условия совпадения резонансных частот продольных и изгибных колебаний, что достигается изменением (подбором) жесткости  $C$  упругой подвески, частотой возмущающих продольных колебаний активного элемента 2 и его геометрией (материалом). Однако практически наиболее эффективным является изменение условий крепления свободного конца элемента 2, в частности, подбором угла  $\alpha$  (рис. 5.6, д). Однако несмотря на относительную простоту схемы исполнения однокомпонентных вибровозбудителей, их использование не обеспечивает симметричного реверса движения, что значительно сужает область их применения.

Возможны схемы вибродвигателей с одномерным движением активного элемента, обусловленным его продольными или поперечными одномерными колебаниями в зоне контакта. На рис. 5.7, а показана схема вибродвигателя в виде двуроторной системы 1, у которой зоны контакта на роторах (с целью исключения составляющих продольного колебания активного элемента 2) расположены строго сим-

метрично относительно оси элемента 2. Роль второго ротора как ограничителя появления изгибных колебаний для однороторных систем выполняют компенсирующие накладки 3 (рис. 5.7, б), и обеспечение максимальной скорости достигается регулированием углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а также параметрами  $A$  и  $\Omega$  колебаний активного элемента 2. Как для одно-, так и для двухроторных систем с одномерными колебаниями в зоне контакта возбуждаются только однокомпонентные колебания основной частоты  $\Omega$ , что приводит к уменьшению постоянной времени в таких системах при работе в переходных режимах движения. Ударное взаимодействие элементов 1 и 2 вибродвигателя определяется с учетом микропроскальзывания и деформации в зоне контакта во время удара, поэтому гипотеза о мгновенности удара здесь неприменима.

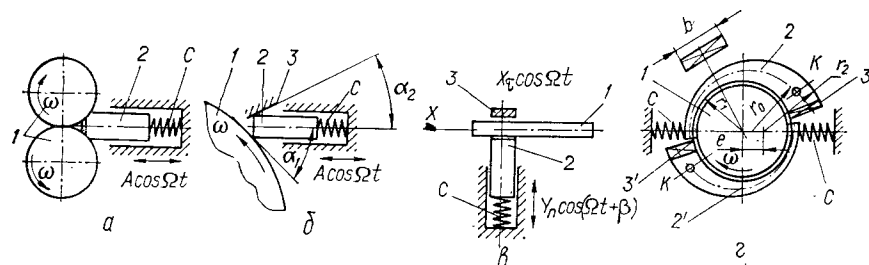


Рис. 5.7. Схемы вибродвигателей с двуроторной (а), однороторной (б) системами, с линейным (в) и криволинейным в виде концентратора (г) возбудителями колебаний

В рассмотренных вибродвигателях в качестве колеблющегося звена использовался один активный элемент. У вибродвигателей с двумя активными элементами в зоне контакта нормальная и тангенциальная составляющие скорости удара формируются отдельными преобразователями, что упрощает процесс регулирования этих составляющих для достижения оптимального соотношения амплитуд тангенциальных и нормальных колебаний. На рис. 5.7, в показана схема линейного вибродвигателя, у которого подвижная система 1 совершает линейные перемещения  $X$  влево или вправо при соответствующем взаимодействии с активными элементами 2 и 3, обеспечивающими нормальные  $Y$  и тангенциальные  $X$  колебания с амплитудами  $Y_n$  и  $X_t$  соответственно. Для таких систем сдвиг  $\beta$  по фазе колебаний равен 0 или  $\pi$  в зависимости от направления движения.

При всех положительных свойствах вибродвигатели обладают существенным недостатком, ограничивающим возможности их применения в робототехнике областью манипулирования и транспортирования объектов небольшой массы. Расширение этой области связано с созданием вибродвигателей повышенной мощности, что обеспечивается, например, применением трансформаторов колебаний, выполненных, в частности, на базе криволинейных концентраторов, которые представляют собой сектор пьезокерамического кольца с аксиальной или радиальной поляризацией. Использование активных элементов в виде криволинейных концентраторов позволяет значительно повысить

тангенциальную составляющую скорости в зоне контакта; причем для схем преобразователей в более мощных вибродвигателях обеспечивается совмещение узла прогиба с узловой плоскостью продольных колебаний — места шарнирного закрепления преобразователей 2—2' в корпусе (плоскость  $K-K$ ). Кроме того, должны соблюдаться фазовые соотношения продольных и изгибных смещений (рис. 5.7, г). Чтобы повысить технологичность изготовления концентраторов, их профили выполняются в виде окружностей радиусов  $r_0$ ,  $r_1$  и  $r_2$ .

Принцип работы таких вибродвигателей заключается в следующем. При возбуждении пьезоэлементов 3 и 3' вдоль оси концентраторов 2 и 2' распространяются с заданной частотой колебания, обеспечивая нормальную (за счет криволинейности и упругих свойств концентраторов) и усиленную тангенциальную (за счет сужающихся к зоне контакта с ротором 1 профилей концентраторов 2 и 2') составляющие скорости в зонах контакта. Характер взаимодействия концентраторов с ротором 1 в зонах контакта аналогичен рассмотренному выше для схем вибродвигателя, изображенного на рис. 5.6, а; при этом функции возбудителей продольных и поперечных колебаний выполняет один элемент — криволинейный концентратор (2 и 2'). Рабочие зоны концентраторов прижимаются к поверхности ротора упругими элементами С. Совокупное действие нормальной и тангенциальной составляющих скорости удара обеспечивает вращение со скоростью  $\omega$  ротора 1, причем направление вращения определяется соотношением (смещение) фаз нормальной и тангенциальной составляющих скорости в зонах контакта. Концентраторы, кроме радиусов криволинейности  $r_0$ ,  $r_1$  и  $r_2$ , характеризуются также неизменной шириной  $b$  в любом сечении.

В табл. 5.1 и 5.2 приведены данные отдельных вибродвигателей линейного и ротационного движения.

Создаваемые на базе вибрационных приводов манипуляционные системы ПР имеют ряд достоинств, которых лишены другие типы промышленных роботов. Так, они просты по конструкции, имеют меньшую

5.1. Характеристики линейных вибродвигателей

Параметр	Тип	
	ВИБ-18	ВИБ-19
Скорость номинальная, м/с	0,1	0,15
Развиваемое при номинальной скорости усилие, Н	1,2	4
Разрешающая способность, м	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Минимальный шаг, м	$4 \cdot 10^{-8}$	Определяется длиной ползуна
Максимальный шаг, м	20	12
Максимальная нагрузка на ползун в плоскости, перпендикулярной вектору скорости, Н	50	60
Питание:		
напряжение при номинальной скорости, В	24	32
частота, кГц	ПКР-6	ПКР-10
Материал преобразователя	0,25	0,12
Масса, кг		

## 5.2. Характеристики ротационных вибродвигателей

Параметр	Тип				
	ВИБ-16	ВИБ-20	ВИБ-22	ВИБ-23	ВИБ-25
Номинальная скорость, рад/с	12	30	12	27	10
Момент при номинальной скорости, Н·м	0,06	0,2	0,35	0,25	0,8
Разрешающая способность, рад	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Максимальный шаг, рад	Не ограничен	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Минимальный шаг, рад	Не ограничен				
Питание:					
напряжение при номинальной скорости, В	60	60	60	75	75
частота, кГц	24	24	24	24	24
Масса, кг	0,1	0,1	0,18	0,2	0,26

массу и габариты, повышенную точность позиционирования. В виброприводах отсутствуют промежуточные передаточные звенья, люфты и зазоры; они обладают высокой разрешающей способностью перемещений, а простота в управлении позволяет стыковать системы управления приводами непосредственно с ЭВМ.

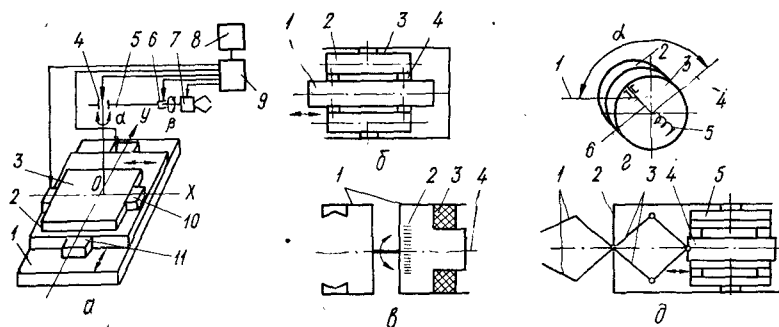


Рис. 5.8. Автоматический манипулятор с высокочастотными приводами: а — общая компоновка; б — устройство телескопического выдвижения платформы; в — узел поворота кисти; г — шарнирное соединение руки манипулятора; д — захватное устройство

Принцип построения и функционирования манипуляционной системы ПР на базе вибрационных приводов рассмотрим на примере схемы автоматического манипулятора (рис. 5.8, а) [38]. Манипулятор содержит неподвижное основание 1 с установленной на нем платформой 2, на которую, в свою очередь, установлена еще одна подвижная платформа 3, перемещающаяся по взаимно перпендикулярным осям ХОУ. Эти транспортные перемещения обеспечиваются отдельными приводами с использованием линейных вибродвигателей 10 и 11 с двумя активными элементами (подобных приведенным на рис. 5.6, а). Поворот руки 5 манипулятора обеспечивается ротационным вибродви-

гателем 4, у которого в виде активного элемента применен пьезокерамический диск. Таким образом, описываемый манипулятор работает в цилиндрической системе координат, причем ориентирующие движения захвата 7 с объектом манипулирования реализуются ротационным вибродвигателем 6 с пьезокерамическим концентратором в качестве активного элемента. Общее управление осуществляется от микро-ЭВМ 8 через устройства сопряжения — преобразователи кода 9. Значения шага по каждой из управляемых линейных координат могут быть 0,1; 0,5; 1; 2; 10 и 50 мкм при частоте шагов 8—600 Гц.

На рис. 5.8, б—д даны компоненты описанного манипулятора, используемые в качестве его элементной базы, соответственно: устройство телескопического выдвижения, привод поворота кисти, механизм шарнира руки манипулятора с волновым приводом и вибрационный привод захвата манипулятора.

Устройство телескопического выдвижения платформы (рис. 5.8, б) состоит из корпуса 3, в котором установлены пьезоэлементы 2 с башмаками 4, закрепленными на пьезоэлементах и соприкасающимися с подвижной платформой 1. Электроды пьезоэлементов вдоль и поперек разделены на симметричные части. Для линейного перемещения платформы 1 две противоположные зоны подключаются к источнику высокочастотного напряжения. При этом в пьезоэлементе возбуждаются продольные и сдвинутые по фазе поперечные колебания, что обуславливает эллипсообразный закон движения башмаков 4. Последние перемещают платформу в направлении, определяемом парой подключенных напротив лежащих зон. При отсутствии высокочастотного питающего напряжения башмаки фиксируют положение платформы.

Привод поворота кисти (рис. 5.8, в) с волновым генератором колебаний содержит кольцевой пьезоэлемент 3, расположенный на руке 4 манипулятора и касающийся своей наружной поверхностью внутренней цилиндрической поверхности кисти 1, установленной в подшипнике качения 2. Электроды пьезоэлемента разделены на части и подключаются к источнику высокочастотного многофазного напряжения. При этом в пьезоэлементе возбуждается продольно-поперечная волна высокочастотных деформаций, которая при взаимодействии через криволинейный концентратор с поворотной частью кисти руки манипулятора приводит ее в движение.

Схема шарнира руки манипулятора с волновым приводом (рис. 5.8, г) содержит звенья 1 и 4 шарнира манипулятора, укрепленные на дисках 2 и 3, один из которых пьезоэлектрический. Диски установлены на оси 6 и прижимаются друг к другу пружиной 5. Электроды пьезоэлектрического диска разделены на части и питаются многофазным напряжением. Возбуждаемая в пьезокерамическом диске бегущая волна деформаций создает движущую силу, осуществляя ротацию диска и поворот звена на угол  $\alpha$ .

В приводе захвата манипулятора (рис. 5.8, д) губки 1, шарнирно закрепленные в корпусе 2, движутся посредством линейно перемещающегося под действием пьезокерамического вибратора 5 сердечника 4 и тяги 3. Работа привода аналогична рассмотренной выше работе устройства телескопического выдвижения руки.

Описанные линейные и ротационные приводы не исчерпывают всего их многообразия, используемого в промышленной робототехнике, и лишь дают представление о наиболее успешно используемых или перспективных реализациях и направлениях работ по созданию высокоэффективных исполнительных механизмов ПР.

## Глава VI

### ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

#### 1. КИНЕМАТИКА СВЯЗИ «ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО — ОБЪЕКТ»

Механизмы захватных устройств (ЗУ) являются одними из основных элементов ПР, которые определяют технологические возможности последних. Общие требования к захватным устройствам — маневренность, универсальность, быстротенность, быстродействие и ограниченная масса — в значительной степени являются идентичными требованиями, предъявляемым к ПР в целом. Специфические требования — надежность захвата и удержания манипулируемых объектов — определяются условиями взаимодействия захватного устройства с объектом удержания, т. е. условиями наложения удерживающих и избыточных связей на объект в процессе его захвата.


























Особенность взаимодействия любого ЗУ, объекта и оснастки заключается в необходимости компенсации неточностей их взаимного положения. В случае идеального взаимного положения ЗУ и объекта последний при захвате испытывает только усилие зажима. Однако в реальных условиях из-за неточности выполнения переносных региональных и ориентирующих движений возможны погрешности расположения объекта относительно зажимных элементов (губок) ЗУ, в результате чего могут возникнуть опасные нагрузки, воспринимаемые кинематической цепью захватное устройство — объект — оснастка. Для предотвращения этого нежелательного явления необходимо при взаимодействии ЗУ с объектом, закрепленным в неподвижной оснастке, обеспечить податливость этой цепи по шести направлениям: вдоль трех взаимно перпендикулярных осей и вокруг них. Это число может быть уменьшено благодаря особенностям взаимодействующих форм объекта и губок, условиям закрепления объекта и податливости элементов оснастки. Нецелесообразно увеличивать податливость других звеньев кинематической цепи манипуляционной системы ПР, так как податливость, приведенная к захватному устройству, зависит от положения этих звеньев и является, таким образом, величиной переменной. Поэтому стремятся обеспечить податливость в элементах захватного устройства, в частности, в зажимных элементах.

Для определения конструктивного исполнения зажимного элемента рассматривают оптимальные условия реализации кинематики связи «захватное устройство — объект», обеспечивающие наложение

достаточных и избыточных связей на объект при его захвате и удержании.

При наличии жестких губок ЗУ может контактировать с поверхностью объекта теоретически не более, чем в трех точках, которые и являются точками наложения связей. Важно, чтобы число связей и места их наложения были достаточными для удержания объекта и не мешали выполнению технологической операции. Практически непрямолинейность образующих объекта, неточности изготовления и погрешности формы приводят к увеличению точек контакта. В других случаях, неправильный выбор конструктивного исполнения губок ЗУ приводит к появлению избыточных связей, которые ухудшают условия захвата и удержания и могут явиться источником дополнительных деформаций в цепи «захватное устройство — объект — оснастка». Для каждого сочетания кинематики связи «захватное устройство — объект» может быть определен индекс связи (табл. 6.1), характер

6.1. Кинематические связи захватное устройство — объект удержания

Губки	Объект			
	Плоский 	Цилиндрический 	Сферический 	Призматический 
Конус описанный 	 $k=2, v=5$	 $k=2, v=5$	 $k=2, v=5$	Аналогично $S-C$ $S-W$
Сфера 	 $k=2, v=5$	 $k=2, v=5$	 $k=2, v=5$	Аналогично $C-C$ $C-W$
Цилиндр 	 $k=4, v=4$	 $k=2, v=5$	 $k=2, v=5$	Аналогично $P-C$ $P-W$
Плоскость 	 $k=6, v=3$	 $k=4, v=4$	 $k=2, v=5$	Аналогично $P-P$ $P-W$
Призма 	Аналогично $P-P$ $W-P$	 $k=6, v=2$ $W-C$	 $k=4, v=4$ $W-S$	$k=6, v=1$ $W-W$
Конус вписанный 	Аналогично $P-P$ $O-P$	Аналогично $P-C$ $O-C$	 $k=6, v=3$ $O-S$	Аналогично $P-C$ $O-W$

теризующийся определенным вариантом наложения связей  $k$  и допускаемой при этом степенью  $v$  подвижности объекта [35]. В частности, при захвате цилиндрических объектов призматическими губками индекс связи  $W-C$ , количество точек контакта (число связей)  $k=6$ , степень подвижности (число координат, по которым допускается перемещение объекта при захвате)  $v=2$ . Аналогично для объекта сферической формы и плоских губок индекс связи  $P-S$ , количество точек

контакта  $k = 2$  и степень подвижности  $\nu = 5$ . Таким образом, имея конкретные типы объектов и руководствуясь допустимыми значениями степеней подвижности из условий удобства обслуживания технологического оборудования или выполнения технологической операции (в частности, сборки изделия), а также учитывая необходимое условие удержания объекта, легко определить количество точек контакта (число связей удержания), индекс связи и одновременно оптимальную конфигурацию губок или другого захватного элемента.

При этом, однако, не учитывается податливость  $\nu_0$  объекта в оснастке, что особенно важно при выполнении или обслуживании промышленным роботом сборочных операций или загрузке технологического оборудования с жестким базированием объектов. Поэтому в общем случае, с учетом особенностей формы объектов и губок, условия закрепления объектов и податливости элементов оснастки число степеней подвижности  $\nu' = 6 - (\nu_0 + \gamma) - \gamma$ , где  $\gamma$  — число возможных движений объекта в оснастке и ЗУ, совпадающих по направлению [13].

## 2. КОНСТРУКЦИИ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ

Наибольшее распространение получили *механические* ЗУ. В них наиболее полно представлены элементы конструктивной базы: привод, усилительно-передающее звено и зажимной элемент. В ряде случаев механические ЗУ снабжают дополнительными информационно-измерительными звеньями, позволяющими выводить рабочие органы ПР в область расположения объектов, а также измерять отдельные параметры захватываемых объектов.

Одна из разновидностей механических ЗУ изображена на рис. 6.1, а. Корпус 1 служит одновременно рабочим пневмоцилиндром привода и базой для крепления реечно-рычажной передачи 4 усилительно-передающего звена. Рабочее тело в полости цилиндра подается по каналам 3, и в зависимости от состояния клапанов, управляющих этими каналами, поршень 2 со штоком и рейкой перемещается в заданном направлении. Перемещение рейки приводит к качению секторов реечно-рычажной передачи 4, а вместе с тем и спаренных параллелограммных механизмов с губками 6 на концах. Использование плоско-параллельных рычагов в параллелограммных механизмах 5 обеспечивает строго параллельное расположение рабочих поверхностей губок 6 во всем диапазоне их перемещения, что удовлетворяет условиям оптимального наложения удерживающих связей на объект при его захвате.

Расчетная формула удержания, учитывающая массу объекта  $P_0$ , силу инерции  $P_y$ , вектор осевой составляющей  $P_c$  и коэффициент трения  $M$  между объектом и губками, имеет вид:

$$P_y \leq \frac{1}{\mu} [P_0 \cos(P_y, P_c) + P_y \cos(P_y, P_c)]_{\max}.$$

По условиям технологического процесса часто одним промышленным роботом приходится обслуживать ряд объектов, отличающихся по форме, физико-механическим свойствам, размерам и другим па-

раметрам, поэтому в ЗУ должна быть предусмотрена возможность быстрой переналадки. Для механических ЗУ такая переналадка, как правило, обеспечивается сменой губок. Однако при этом удается обеспечить переналадку в узком диапазоне номенклатуры захватываемых

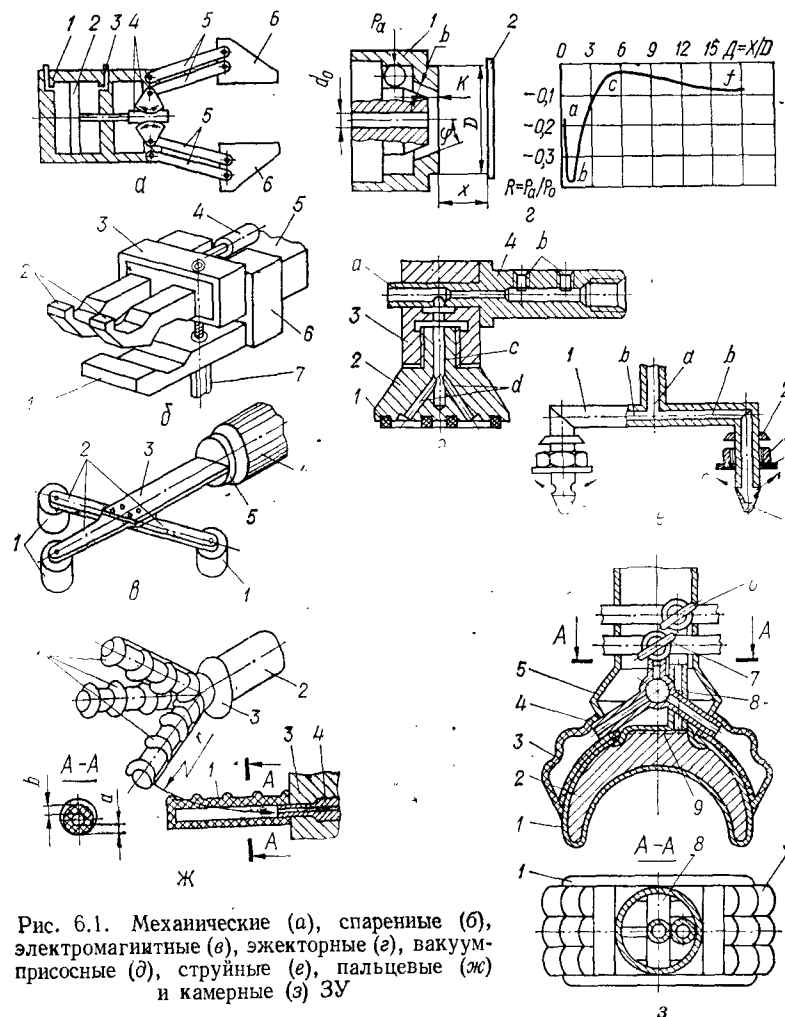


Рис. 6.1. Механические (а), спаренные (б), электромагнитные (в), эжекторные (г), вакуум-присосные (д), струйные (е), пальцевые (ж) и камерные (з) ЗУ

объектов, поэтому необходимы более универсальные устройства за счет конструктивных решений. В частности, широкими технологическими возможностями обладают *механические спаренные* захватные устройства (рис. 6.1, б). Это достигается совмещением в одном ЗУ двух механизмов: нижнего 1 и верхнего гравитационного 2, расположенных в корпусе 6; в свою очередь, корпус 6 крепится в руке 5 манипуляционной системы ПР. Устройство может захватывать объекты между нижним механизмом 1 и внутренней профилированной поверх-

ностью верхнего механизма 2. Для этого привод 7 вертикального перемещения корпуса 3 верхнего механизма 2 сводит механизмы 1 и 2 до полного зажима находящегося между ними объекта. В случае работы с объектами, не требующими четкого фиксирования в ЗУ, используется гравитационный призматический механизм 2. ЗУ снабжено приводом 4 вращения для осуществления ориентирующих движений вокруг оси крепления корпуса 6 к руке 5 ПР.

Наличие на производстве большой номенклатуры объектов из ферромагнитных материалов предопределяет целесообразность использования *электромагнитных ЗУ*. Особенно успешно такие устройства применяются в заготовительном производстве при обслуживании объектов плоской формы. Магнитные ЗУ отличаются простотой конструктивного исполнения, надежностью захвата объектов, возможностью управления усилием захвата и быстрой переналадки сменой зажимных элементов. Одна из разновидностей магнитных захватных устройств показана на рис. 6.1, в и может использоваться как для захвата отдельных объектов из листового материала, так и для группового захвата объектов каждым из электромагнитных концентраторов 1, входящих в состав устройства. Количество электромагнитов, таким образом, определяется необходимым числом одновременно захватываемых объектов или требованиями обеспечения определенного усилия захвата, распределенного по поверхности захватываемого объекта. Как правило, магнитные ЗУ очень просты в конструктивном исполнении и содержат собственно электромагнитную систему в виде концентраторов, располагаемых на сменных кронштейнах 2, которые укреплены на основании 3. Далее в кинематической цепи предусмотрены традиционные элементы — кисть 5 и рука 4 ПР, на которых устанавливается магнитное захватное устройство.

Усилие захвата  $P_m$  определяется свойствами материала объекта и площадью  $S$  контакта:  $P_m = (B/10^4)^2 S$ , где  $B$  — магнитная индукция.

Практика промышленных предприятий подтверждает высокие показатели надежности и долговечности пневматических струйных систем. Большой интерес для промышленной робототехники и, в частности, при создании ЗУ для ПР, представляют *струйные вихревые преобразователи*. К преимуществам таких преобразователей, используемых в качестве захватных устройств ПР, следует отнести прежде всего возможность совмещения функций получения и преобразования информации о положении объектов роботизации, а также управления процессом выведения рабочих органов ПР в область расположения объекта роботизации с захватом последнего. Как показали исследования [64], более широкий диапазон измерения и линейную характеристику наибольшей протяженности имеет струйный преобразователь вихревого типа с кольцевым сходящимся соплом (рис. 6.1, г). Предел измерения и определения удаленности расположения объекта 2 от кольцевого сопла преобразователя 1 достигает 70 мм. При этом оптимальными являются следующие параметры преобразователя: ширина кольцевого зазора  $b = 0,722$  мм, расстояние от торца кольцевого сопла до торцевой поверхности преобразователя  $K = 0,045$  мм, угол

конуса преобразователя  $2\varphi = 60^\circ$ , диаметр кольцевого сопла  $D = 6,5$  мм. При этом наибольшее среднее передаточное отношение преобразователя  $R = 56,4$  на участке  $b - c$  характеристики при давлении питания преобразователя  $p_0 = 40$  кПа.

Свойства преобразователя по обнаружению и захвату объекта видны из его рабочей характеристики в трех явно выраженных участках. Участок  $c - f$  не используется для точного измерения, так как чувствительность преобразователя на этом участке низкая; вместе с тем зависимость коэффициентов давления  $R$  (отношение атмосферного давления  $p_a$  к давлению питания  $p_0$ ) от параметра  $D$  (отношение расстояния  $x$  торца преобразователя до объекта к диаметру  $D$ ) может быть использована для предварительного снижения скорости перемещения рабочих органов ПР в направлении объекта перед этапом захвата последнего. Участок  $b - e$  характеристики служит для точной индикации положения детали и одновременного управления скоростью точного позиционирования преобразователя в область расположения объекта. Третий участок характеристики  $a - b$  определяет эжекторный характер взаимодействия преобразователя и объекта, когда объект «засасывается» струей воздуха, истекающего из сопла. В частности, для приведенных выше параметров преобразователя и давления питания  $p_0 = 80$  кПа обеспечивается удержание объекта массой 1 кг, если последний перекрывает торец преобразователя диаметром 15 мм.

Описанный преобразователь-захват, в отличие от известных вакуумных присосок с эластичным элементом, не предъявляет высоких требований к чистоте обработки поверхности объекта и его температуре.

Конструктивно ЗУ *эжекторного типа* представляет собой (рис. 6.1, д) корпус 3 с укрепленным на нем держателем 2 с резиновым амортизирующим кольцом 1. Корпус 3 связан с распределителем 4, устанавливаемым на кисти ПР. Система распределения воздуха по питающим каналам  $e$  и рабочим соплам  $d$  от жиклера  $a$  позволяет создать эффект отсасывающего действия из-под резинового кольца 1, за счет чего объект прижимается к торцу кольца 1. Регулирование усилия захвата и вывод характеристики ЗУ на рабочий режим производится регулировочными каналами  $b$ . Для эжекторных, а также вакуум-присосных ЗУ характерен амортизирующий эффект, в связи с чем такие устройства чаще всего используются для легкодеформируемых и хрупких объектов.

Аналогичную изображенной на рис. 6.1, д конструкцию имеют и вакуум-присосные ЗУ с тем отличием, что эжекторный канал  $a$  заглушается с внешней стороны, а в распределитель 4 подается не струя воздуха, а создается разрежение. Основным параметр — усилие захвата  $P_v$  для вакуумных устройств — определяется площадью контакта с объектом и удельным давлением (разрежением)  $\Delta p$ :

$$P_v = \varepsilon \frac{\pi D^2}{4} (1 - \Delta p) 10^5,$$

где  $\Delta p \approx 0,2 \dots 0,5$ ;  $\varepsilon = 0,6 \dots 0,8$ ;  $D$  — диаметр резинового кольца.

В точном приборостроении, электронной и смежных отраслях

промышленности при работе с плоскими и цилиндрическими объектами небольшой массы и габаритов широко применяются *струйные* опорные ЗУ. Одним из достоинств таких устройств является возможность комплектации изделия или накопления объектов; второе достоинство — простота конструктивного исполнения и удобство в обслуживании. Конструктивно такие устройства представляют собой корпус 1 (рис. 6.1, е), совмещающий функции распределителя потока воздуха, поступающего по входному каналу *a*, по каналам *b* питания рабочих сопел *c* захватного устройства. Изображенная на рис. 6.1, е конструкция ЗУ предназначена для обслуживания объектов, имеющих сквозное отверстие: шунтов, статоров и роторов конденсаторов переменной емкости, обыкновенных и пружинных шайб, гаек и т. п. При захвате рабочие элементы 5 вводятся в отверстия объектов 3, 4, и струя воздуха подается в рабочие сопла *c*. Последние выполнены под углом к образующей рабочих элементов 5, так что истекающие из сопел *c* струи воздуха прижимают объекты 3 и 4 к ограничительному бурту 2. Если выполнить сопла спиральными с углом закрутки относительно образующих рабочих элементов, можно придать вращательное движение накапливаемым и прижимаемым к ограничительному бурту 2 объектам 3 и 4, т. е. ориентировать объекты при переносе их от позиции захвата к рабочей.

Возможно также и другое исполнение струйных ЗУ, которые обслуживают плоские объекты без сквозного отверстия [34]. Однако в любом случае захват и удержание объектов осуществляются под действием струи истекающего под определенным углом к образующей рабочего элемента воздуха.

Использование в качестве зажимных камерных элементов позволяет создавать простые по конструктивному исполнению и надежно работающие ЗУ. Такие устройства обладают высокой степенью адаптации к форме захватываемых объектов. В ряде случаев удается имитировать действие фаланг пальцев руки человека, что достигается своеобразным исполнением камерных элементов. Так, изображенное на рис. 6.1, ж камерное ЗУ содержит трехэлементную систему 1, укрепленную посредством стыковочного узла 3 с рукой 2 ПР. Элементы системы 1 разведены под углом  $120^\circ$  к плоскости крепления на стыковочном узле 3 и представляют собой полые резиновые (или выполненные из другого эластичного материала) оболочки, внутренние полости которых посредством штуцера 4 соединены с источником сжатого воздуха или жидкости. Гофрированная внутренняя поверхность элементов 1 на утолщенной стенке *b* оболочки (см. сечение А—А) предназначена для увеличения надежности захвата объектов, который осуществляется следующим образом. При подаче рабочего тела через штуцер 4 во внутреннюю полость элемента последний начинает изгибаться по радиусу *r* за счет разности толщин *a* и *b* ( $b > a$ ) его внутренней и внешней стенок соответственно, плотно охватывая находящийся во внутренней полости системы камерных элементов 1 объект. Усилие захвата определяется разностью толщин *a* и *b* стенок оболочек и рабочим давлением в их полостях.

Часто камеры ЗУ заполняют сыпучей средой, а деформация камер при захвате объектов обеспечивается работой системы рычагов. Опыт эксплуатации таких захватных устройств, снабженных механическими рычагами, выявил несовершенство их конструкций. Новые возможности открываются при замене жестких механических рычагов с силовыми приводами и укрепленными на рычагах резиновыми камерами с сыпучими материалами одним резиновым баллоном с подковообразным сечением, заполненным сыпучей средой [53]. Захватное устройство одной из таких конструкций (рис. 6.1, з), закрепленное с помощью стыковочного элемента 5 с рукой ПР, содержит две пневматические системы. Одну из них составляют трехходовой электромагнитный вентиль 6, фильтрующий элемент 9 и тонкостенная рабочая камера 1, заполненная сыпучим материалом 2. Вторая система содержит трехходовой электромагнитный вентиль 7, распределительный коллектор 8 с каналами 4 подвода сжатого воздуха и соединенные с ними заглушенные на концах приводные камеры 3 с плоскими внутренними и гофрированными наружными стенками. Приводные камеры внутренними плоскими стенками закреплены на наружных стенках рабочей камеры 1.

В нерабочем состоянии полости приводных камер 3 и рабочей камеры 1 через вентили 7 и 6, соответственно, связаны с атмосферой, так что края камеры 1 разведены за счет ее упругих свойств или под действием специальных, работающих на сжатие, пружин (на рис. 6.1, з не показаны). В таком состоянии захватное устройство подготовлено к работе и выводится рукой ПР в область расположения захватываемого объекта. Объект, оказавшийся между губками рабочей камеры 1, захватывается переводом вентиля 7 в рабочее положение, при котором полости приводных камер 3 подсоединяются к источнику сжатого воздуха. При этом гофрированная сторона камер 3 удлиняется, приводя в движение губки рабочей камеры 1. Последние при сближении захватывают объект, и при достижении полного охвата объекта рабочей камерой 1 изменяется положение вентиля 6, что обеспечивает отсос воздуха из рабочей камеры. При этом фильтр 9 препятствует увлечению сыпучего материала из полости в канал разрежения. Под действием избыточного внешнего давления сыпучий материал теряет способность к смещению частиц друг относительно друга, в связи с чем наполнитель рабочей камеры 1 как бы «затвердевает» без изменения формы камеры. Таким образом, обеспечивается усилие, достаточное для надежного удержания объекта между губками рабочей камеры. Для освобождения объекта полости приводных 3 и рабочей 1 камер соединяются посредством вентиля 7 и 6 с атмосферой.

Описанное ЗУ может использоваться для захвата и удержания объектов из различных материалов, имеющих разнообразную форму, без какой-либо переналадки.

### 3. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Для манипулирования твердыми, хрупкими или мягкими (нежесткими) объектами произвольной формы используются многозвенные механизмы с волнообразным движением. В таких механизмах звенья

приводятся в движение двумя тросами через систему роликов. ЗУ может удерживать объект любой формы, причем давление распределяется равномерно по всей линии контакта звеньев с объектом. Плотное облегание по всем точкам контура обеспечивается как для выпуклых, так и для вогнутых профилей объектов. Необходимым условием является размерное ограничение на звенья — они должны представлять собой малые сегменты, не имеющие резких изломов по длине. Наличие двух приводных тросов объясняется их функциями: один разжи-

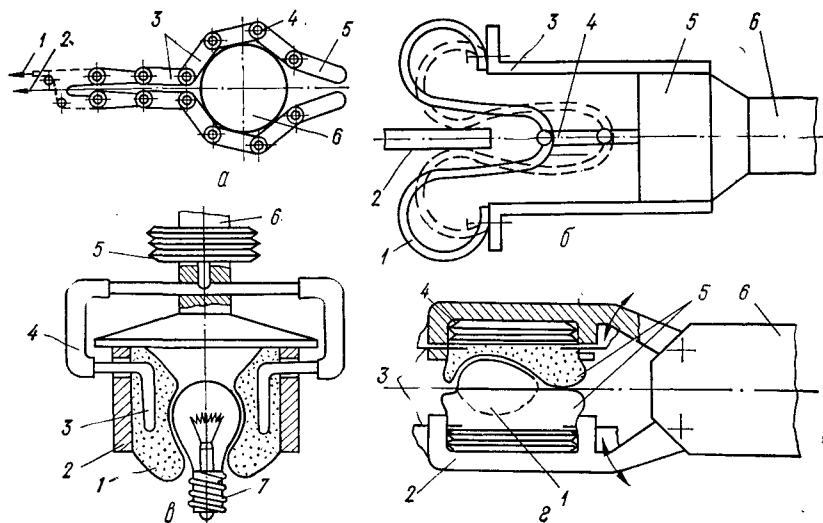


Рис. 6.2. Универсальные ЗУ:

а — многозвенное; б — с эластично-охватывающей гибкой лентой; в — с гранулированным наполнителем; г — с электрореологической жидкостью в камерах

мает звенья при необходимости высвобождения объекта, другой сжимает звенья ЗУ при захвате объекта. Таким образом, устройство не имеет индивидуальных сервоприводов для каждого из звеньев; а приводится в действие с помощью натяжения общих для всех звеньев тросов. Это упрощает конструкцию ЗУ в целом и повышает надежность его работы. Конструктивно ЗУ с описанными свойствами показано на рис. 6.2, а [79] и представляет собой многозвенные кинематические цепи 3, звенья которых соединены сдвоенными роликами 4. Каждая из систем сдвоенных роликов связана тросовыми передачами 1 и 2, соответственно, для сжатия и разжатия многозвенных кинематических цепей. Захват объекта 6 начинается с начального положения захватного устройства, при котором за счет натяжения троса 2 звенья разжаты; при этом трос 1 ослаблен. Когда объект попадает в область захвата, т. е. оказывается между разжатыми нижней и верхней многозвенными кинематическими цепями 3, постепенно ослабевает трос 2 и натягивается трос 1. При натяжении троса 1 в процесс захвата вовлекаются поочередно все звенья кинематической цепи в направлении от основа-

ния до конечных звеньев 5 до тех пор, пока объект не окажется равномерно охваченным по периметру с пропорционально распределенным захватным усилием. Поскольку каждым звеном обеспечивается определенное зажимное усилие, последовательно, при достижении такого усилия в очередном звене цепи 3, начинает поворачиваться следующее звено, пока и оно не войдет в плотное соприкосновение с объектом. Разжимание звеньев происходит в обратном направлении — от конечных звеньев 5 к основанию захватного устройства.

Одним из основных вопросов при проектировании многозвенных ЗУ является выбор конструктивных соотношений роликового приводного механизма. Для конструкции со сдвоенными роликами соотношения радиусов роликов определяются последовательностью: 1, 9/11, 8/10, 7/9, 6/8, 5/7, 4/6, 3/5, 2/4, 1/3, 0. Именно такие соотношения радиусов роликов в одиннадцатизвенной кинематической цепи с длиной звеньев по 3 см каждое при силе натяжения тросов 1Н позволяет захватному устройству развивать удельное захватное усилие 20 Н/м. Равномерное давление на поверхность захватываемого объекта, возможность регулирования захватного усилия в широком диапазоне, применимость к захвату объектов сложной формы обеспечивают широкое применение многозвенного механического ЗУ при обслуживании технологических процессов машино-, приборо-, электроаппаратостроения и др.

Наличие передаточных звеньев и необходимость установки приводного элемента двустороннего действия, а также использование тросовых передач снижают надежность ЗУ и усложняют конструкцию. Кроме того, наличие конструктивных ограничений при выборе минимального размера элементов многозвенной кинематической цепи приводит к возникновению дискретных точек касания звеньев с поверхностью захватываемого объекта, и, как следствие, — к концентрации нагрузок на отдельных участках поверхности объекта.

Этих недостатков можно избежать, если зажимной элемент выполнить в виде гибкой ленты 1, концы которой жестко заделаны в корпус 3 ЗУ (рис. 6.2, б). Шток 4 пневмопривода 5 присоединен к среднему перегибу ленты 1, два крайних перегиба которой служат губками ЗУ. Все устройство крепится к руке 6 ПР (или к ее кисти) [4].

В исходном положении шток 4 выдвинут влево, и гибкая лента 1 занимает положение, обозначенное на чертеже сплошной линией. После выведения ЗУ манипуляционной системой промышленного робота в область расположения объекта 2 от системы управления ПР на привод 5 подается команда на перемещение штока 4 вправо. Продольное перемещение штока 4 вправо вызывает деформацию упругой ленты 1, приводящую к перекатыванию ее внешних перегибов и уменьшению радиуса кривизны соответствующего участка ленты у мест ее крепления с корпусом 3. При этом появляются напряжения, стремящиеся сжать деталь 2 внешними перегибами-губками. Усилие захвата определяется упругими свойствами материала ленты 1, ее конструктивными параметрами (длина, ширина, толщина и радиусы закругления в местах крепления к корпусу 3 и штоку 4 привода 5), а также габаритами захватываемого объекта.

В исходное положение губки возвращаются под действием сил упругости материала ленты, и в этом случае для работы ЗУ достаточно приводного элемента одностороннего действия. Если же этих сил недостаточно для возвращения губок в исходное положение, используются приводы двустороннего действия.

Описанное ЗУ предназначено для захвата объектов, имеющих плоские поверхности, с которыми наилучшим образом взаимодействует эластичная лента. Наибольшей универсальностью обладают камерные ЗУ с *эластично-охватывающими зажимными* элементами, позволяющими захватывать объекты произвольной формы, жесткости и выполненных из различных материалов, обеспечивая при этом оптимальные условия наложения удерживающих связей.

Конструктивно (рис. 6.2, а) ЗУ с гранулированным наполнителем в зажимных элементах содержит корпус 2 с размещенными в нем камерами 1 и силораспределительными нагнетателями 3, каналы 4 для подвода рабочего тела в полости камер 1 и амортизирующий сильфон 5. ЗУ крепится к руке 6 (или ее кисти) ПР.

В исходном положении рабочие камеры находятся в свободном состоянии, при котором рабочее тело (воздух) стравливается через нагнетатели 3 и каналы 4 в атмосферу. В этом состоянии ЗУ выводится манипуляционной системой ПР в область расположения объекта 7. После того, как объект попал в зону между рабочими камерами 1, от системы управления ПР поступает команда на подачу воздуха через каналы 4 и нагнетатели 3 в полости рабочих камер 1, и при достижении в полостях последних давления, достаточного для удержания объекта, система подачи воздуха в полости камер отключается. Объект 7 высвобождается стравливанием воздуха из полостей рабочих камер 1 и возвращением их в исходное положение.

Одним из недостатков рассмотренных универсальных камерных ЗУ с эластично-охватывающими зажимными элементами является избыточное давление на поверхность захватываемых объектов при наложении удерживающих связей. В ряде случаев, особенно при обслуживании объектов из хрупких материалов, избыточное давление недопустимо, а процесс удержания должен осуществляться за счет гравитационных сил. Вместе с тем сложная форма объектов и отсутствие четко выраженных базирующих поверхностей не допускают применения призматических, штыревых и других гравитационных захватных устройств.

Управление усилием захвата возможно при использовании универсальных камерных захватных устройств, у которых в качестве зажимных элементов применяются камеры из эластичного тонкостенного материала, заполненные электроореологической или электромагнитной жидкостями и снабженные, соответственно, управляемыми источниками электрического или магнитного полей [34]. ЗУ (рис. 6.2, б) содержит корпус 6, в котором подвижно крепятся рычаги 2 с губками 5 в виде камер из эластичного тонкостенного материала. Камеры соединены с рычагами через сильфоны 4, создающие амортизационный эффект при захвате объекта. Наполнителями камер 5 являются электро-

ореологическая или магнитная жидкости, представляющие собой суспензию, в состав которой входят жидкое тело (масло, керосин и т. п.) и находящиеся в нем во взвешенном состоянии частицы различных материалов (для электроореологической жидкости, например, силикатов, и для магнитных жидкостей — ферромагнитные наполнители). В корпусах рычагов 2 в местах сочленения с камерами установлены управляемые источники 3 электрического (например, электроды) или магнитного (например, электромагнитные катушки) полей.

Захватное устройство работает следующим образом. В исходном положении рычаги 2 разведены, источники 3 электрического (магнитного) поля обесточены и электроореологическая (магнитная) жидкость в камерах 5 губок находится в свободном (аморфном) состоянии. При необходимости захвата объекта 1 захватное устройство предварительно выводится манипуляционной системой ПР в зону расположения объектов различной формы, которые могут находиться в навале в произвольном положении, либо в предварительно ориентированном (упорядоченном) положении.

После введения ЗУ в область расположения объекта 1 рычаги 2 по команде системы управления промышленным роботом сводятся до крайнего фиксированного положения. При этом в зависимости от свойств захватываемого объекта (жесткости, условий деформируемости поверхностей и т. п.) на управляемые источники 3 электрического (магнитного) поля от системы управления поступают управляющие сигналы необходимого уровня. Изменение напряженности электрического (магнитного) поля приводит к изменению вязущих свойств наполнителей камер 5; изменяются упругие свойства губок, что обеспечивает необходимое для надежного захвата и удержания объекта усилие, не превышающее допустимого из условия неповреждения деформируемых поверхностей захватываемого объекта значения. Если же форма захватываемого объекта допускает обтекание его поверхностей эластичной тонкостенной камерой, удержание может происходить за счет гравитационных сил, т.е. массы самого объекта без дополнительных деформирующих усилий со стороны губок.

После транспортирования (манипулирования) объекта 1 к рабочей позиции управляемые источники 3 обесточиваются, свойства рабочей жидкости губок 5 восстанавливаются, рычаги 2 разводятся, и объект освобождается. Таким образом, применение электроореологических и магнитных жидкостей в качестве наполнителей рабочих камер позволяет за счет увеличения номенклатуры захватываемых объектов значительно расширить технологические возможности ЗУ.

#### 4. АДАПТИВНЫЕ ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Совершенствование ПР, а также расширение областей их применения связано с созданием адаптивных (очувствленных) ЗУ, позволяющих совмещать функции захвата объектов с контролем их геометрических параметров, определения принадлежности объектов к определенному классу и их расположением в пространстве. Работы по очувствлению роботов ведутся в настоящее время, главным образом,

в двух направлениях: оснащения их техническим зрением и тактильной чувствительностью.

**Захватные устройства с тактильной чувствительностью.** Рассмотрим наиболее перспективные направления создания ЗУ, решающих задачи контроля геометрических параметров, распознавания формы, класса и различного положения объекта в пространстве и оснащенных тактильной чувствительностью.

На рис. 6.3, а изображено ЗУ с ленточным возвратно-поступательным механизмом [6], обеспечивающее повышение надежности захвата объектов точным

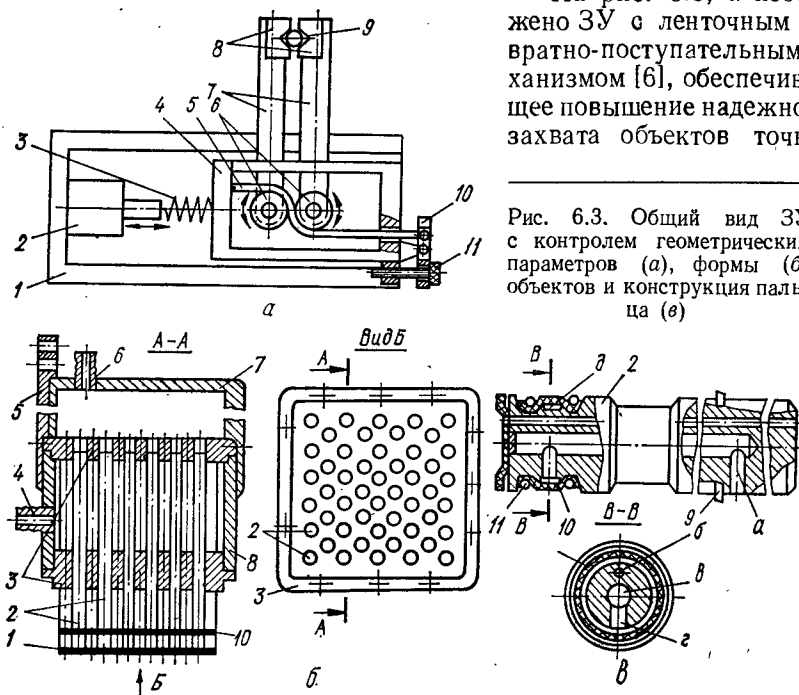


Рис. 6.3. Общий вид ЗУ с контролем геометрических параметров (а), формы (б) объектов и конструкция пальца (в)

их базированием, а также переналадку на объекты разных типоразмеров. ЗУ содержит две съемные губки 8, установленные на рычагах 7, которые посажены на оси 6 с роликами, охваченными гибкой лентой 5. Оси роликов 6 установлены в корпусе 1 захватного устройства и, таким образом, являются неподвижными по отношению к перемещающейся в направляющих корпуса рамке 4. Гибкая лента 5 одним концом заделана жестко в левой грани рамки, другим — с помощью шарнира соединена с коротким плечом двуплечего рычага 10; длинное плечо рычага связано с регулировочным винтом 11. Такая механическая система представляет собой преобразователь линейных возвратно-поступательных движений выходного штока приводного двигателя 2 во вращательное движение установленных на оси роликов 6, а также в сводящее и разводящее движения посаженных на ролики рычагов 7. Демпфирующее действие обеспечивается упругими свойствами связи 3 штока приводного двигателя 2 с рамкой 4. Губки 8

выполнены в виде призм, в которые устанавливаются сменные контактные пластины.

Захватное устройство работает следующим образом. В исходном положении шток приводного двигателя с рамкой 4 находится в левом крайнем положении, и рычаги 7 с губками 8 разведены в стороны. После выведения ЗУ манипуляционной системой робота в область расположения объекта 9 системой управления ПР формируется команда на захват последнего. Включается приводной двигатель 2, его шток через упругую связь 3 воздействует на рамку 4, и последняя перемещается слева направо, протаскивая гибкую ленту 5 через укрепленные на осях ролики 6. Рычаги начинают сходиться до захвата объекта губками. Поскольку размер захватываемого объекта может быть отличным от номинального (например, при его максимальном значении), в кинематической цепи оси роликов — рычаги 7 — губки 8 — сменные контактные пластины — объект 9 возникают деформации. Предотвращение чрезмерных деформаций, приводящих к аварийным ситуациям, а также к повреждению поверхности объекта, достигается демпфирующей упругой связью 3 и правильным подбором угла охвата роликов гибкой лентой, соотношением коэффициентов трения материалов роликов и ленты и натяжением ленты регулировочным механизмом 10—11. Вместе с тем сжатие упругой связи 3 повышает надежность захвата объекта губками ЗУ.

При необходимости захвата и контроля многоступенчатых объектов (типа ступенчатый вал, втулка) ЗУ снабжается несколькими преобразователями поступательных перемещений во вращательные, имеющими различные передаточные отношения за счет подбора диаметров роликов соответственно ступеням объектов, на которые накладываются удерживающие связи, и выполненными аналогично преобразователю 8—5—6—7. Преобразователи располагаются друг над другом и приводятся в движение от одного приводного двигателя.

Усилие захвата объекта в описанном ЗУ определяется выражением\*

$$P = cY_{\text{пр}}i = cY_{\text{св}} \frac{0,5d}{L},$$

где  $c$  — жесткость упругой связи 3;  $i$  — передаточное отношение кинематической цепи рычаг 7 — ролик 6;  $Y_{\text{св}}$  — ход упругой связи;  $d$  — диаметр ролика 6;  $L$  — длина рычага 7.

Из приведенного выражения следует, что усилие захвата зависит от хода упругой связи. Для обеспечения постоянства усилия захвата предусмотрена конструкция захватного устройства с фрикционной связью между приводными роликами 6 и рычагами 7 устройства. Регулировка усилия захвата осуществляется по объекту с наименьшим возможным диаметром. Тогда рамка 4 перемещается до тех пор, пока шток приводного двигателя 2 и упругая связь 3 не займут свои крайние правые положения, что будет соответствовать расчетному усилию

\* Методика расчета разработана инж. Б. Н. Певзнером под руководством канд. техн. наук Л. С. Ямпольского.

зажима. При захвате других (большого диаметра) объектов шток двигателя 2 дойдет до своего крайнего правого положения, а упругая связь 3 при своем перемещении после создания расчетного усилия зажима вызовет дальнейшее перемещение рамки 4, но уже в режиме проскальзывания ленты 5 относительно роликов 6. Таким образом, усилие зажима оказывается равным силе трения между лентой и роликами и практически не зависит от абсолютного размера захватываемого объекта в диапазоне, на который настроено захватное устройство. Для удержания захватываемого объекта должно соблюдаться равенство  $4F_1f = G$ , где  $f$  — коэффициент трения захватываемого объекта о губку захватного устройства;  $G$  — масса захватываемого объекта;  $F_1$  — действующая со стороны губок на объект сила от одной из четырех контактных пластин. Усилие в соединении рычаг 7 — губка 8 определяется зависимостью

$$F_2 = \frac{F_1}{\sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{G}{4f \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (6.1)$$

где  $\gamma$  — угол створа контактных пластин, расположенных на одной губке. Для надежного удержания объекта должно соблюдаться неравенство

$$M_{F_2} < M_{\text{тр}1} + M_{\text{тр}2}, \quad (6.2)$$

где  $M_{F_2}$  — момент силы  $F_2$ ;  $M_{\text{тр}1}$  — момент силы трения ленты о ролик;  $M_{\text{тр}2}$  — момент силы трения ролика об его ось.

Для левой губки

$$M_{\text{тр}1}^n = (S_2 - S_1) \frac{d_1}{2},$$

где  $S_1, S_2$  — усилия натяжения ленты, развиваемые левым и правым роликом, соответственно;  $d_1$  — диаметр левого ролика.

Для правой губки

$$M_{\text{тр}1}^n = (S_1 - T) \frac{d_2}{2},$$

где  $T$  — усилие натяжения ленты, устанавливаемое регулировочным механизмом 10—11;  $d_2$  — диаметр правого ролика.

По формуле Эйлера определяем усилия  $S_1$  и  $S_2$ :

$$S_1 = Te^{f_1\alpha_1}; \quad S_2 = S_1 e^{f_2\alpha_2} = Te^{(f_1\alpha_1 + f_2\alpha_2)},$$

где  $f_1, f_2$  — соответственно коэффициенты трения ленты о правый и левый ролики;  $e$  — основание натурального логарифма;  $\alpha_1, \alpha_2$  — углы обхвата соответственно правого и левого роликов лентой.

После подстановок и преобразований получаем

$$\begin{aligned} M_{\text{тр}1}^n &= (Te^{(f_1\alpha_1 + f_2\alpha_2)} - Te^{f_1\alpha_1}) \frac{d_1}{2} = \\ &= Te^{f_1\alpha_1} (e^{f_2\alpha_2} - 1) \frac{d_1}{2}; \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$M_{\text{тр}1}^n = T (e^{f_1\alpha_1} - 1) \frac{d_2}{2}. \quad (6.4)$$

С учетом сил трения роликов об ось соответствующие моменты сил трения

$$M_{\text{тр}2}^n = R_2 f_3 \frac{d_3}{2}; \quad (6.5)$$

$$M_{\text{тр}2}^n = R_1 f_3 \frac{d_4}{2}, \quad (6.6)$$

где

$$R_1 = T \sqrt{e^{2f_1\alpha_1} + 1 + 2e^{f_1\alpha_1} \sin \beta}; \quad R_2 = Te^{f_1\alpha_1} \sqrt{1 + e^{2f_2\alpha_2} + 2e^{f_2\alpha_2} \sin \beta};$$

$\beta$  — угол между вектором силы  $S_1$  и горизонталью;  $d_3, d_4$  — соответственно диаметры осей левого и правого роликов;  $f_3$  — коэффициент трения ролика на осях.

С учетом выражения (6.1) момент силы  $F_2$

$$M_{F_2} = F_2 L = \frac{GL}{4f \sin \frac{\gamma}{2}},$$

тогда условие (6.2) удержания объекта принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{GL}{4f \sin \frac{\gamma}{2}} &\leq T \left[ (e^{f_1\alpha_1} - 1) \frac{d_2}{2} + e^{f_1\alpha_1} (e^{f_2\alpha_2} - 1) \frac{d_1}{2} + \right. \\ &\left. + \sqrt{1 + e^{2f_1\alpha_1} + 2e^{f_1\alpha_1} \sin \beta} + e^{f_1\alpha_1} \sqrt{1 + e^{2f_2\alpha_2} + 2e^{f_2\alpha_2} \sin \beta} \right]. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Задаваясь значениями массы  $G$  объекта и допустимыми из условий механических его свойств нагрузками  $F_{\text{пред}}$  на поверхность захвата, можно определить конструктивные параметры ЗУ из условия (6.7).

Переналадка ЗУ заключается в регулировании натяжения гибкой ленты регулировочным винтом 11, смене рычагов 7, контактных пластин, роликов 6 и упругой связи 3.

Расширение технологических возможностей, повышение производительности и надежности работы ПР достигается применением универсальных ЗУ, не только обеспечивающих возможность обслуживания объектов произвольной формы, но и совмещающих функции захвата с распознаванием класса захватываемого объекта и его расположения в пространстве. Одним из перспективных направлений разработки оцувствленных универсальных ЗУ является создание многопальцевых конструкций, снабженных преобразователями линейных перемещений для каждого из пальцев устройства [8].

Такое ЗУ (рис. 6.3, б, в) содержит корпус 8 с пневмокамерой, основания 3 которой представляют собой сотовые поверхности со сквозными отверстиями в качестве направляющих для пальцев 2. Система подводных и отводящих каналов 4 служит для подачи и отвода воздуха из полости пневмокамеры ЗУ. Корпус 8 крепится к кронштейну 5, связывающему ЗУ с кистью или рукой манипуляционной системы ПР. Пальцы 2 имеют систему внутренних каналов а, б, в, г, выполняющих соответствующие функции. Каналы а, в, г предназначены для подачи сжатого воздуха в камеру г и к упругим элементам 10 (эластичные

камеры, смонтированные в кольцевых проточках пальца 2), которые для создания герметичности зафиксированы в проточках пружинными кольцами 11.

Для усиления захватывающего действия ЗУ снабжается вакуумной камерой корпуса 7 с системой каналов 6 откачивания воздуха из полости камеры; при этом на рабочем торце каждого из пальцев смонтирована вакуумная присоска 1, сообщающаяся посредством канала 6 пальца 2 с камерой корпуса 7. Ход всех пальцев 2 внутри корпуса 8 ограничен буртиком 9.

Работа ЗУ осуществляется следующим образом. В исходном состоянии камеры корпусов 7 и 8 связаны с атмосферой, пальцы 2 находятся в крайнем нижнем положении. Манипуляционная система ПР выводит ЗУ в область расположения объекта или группы объектов, которые должны быть захвачены и перетранспортированы в заданную позицию. Затем ЗУ вместе с кронштейном 5 по команде от системы управления промышленным роботом начинает опускаться вертикально вниз. Те пальцы, которые оказались непосредственно над горизонтальными участками наружной поверхности захватываемого объекта (группы объектов), утапливаются в корпус 8. Пальцы, которые не упираются своими торцами в горизонтальные участки наружной поверхности объекта, остаются в исходном максимально опущенном положении, опираясь при этом буртиком 9 на нижнее основание 3 корпуса 8. После этого в пневмокамеру корпуса 8 подается сжатый воздух через трубопровод 4, который далее, по каналам а, в, г пальца 2 поступает к упругим элементам 10. Элементы деформируются наружу и входят в соприкосновение с боковыми наружными и внутренними вертикальными и наклонными поверхностями объекта, происходит обжатие последнего по этим поверхностям. При этом упругие элементы 10 фиксируют пальцы 2 на той высоте, которую они заняли под действием на них захватываемых объектов. Для усиления захватывающего действия используются вакуумные присоски 1, в связи с чем в камере корпуса 7 (рис. 6.3, б) создается разрежение после того, как поверхность присосок вошла в соприкосновение с горизонтальными участками поверхности захватываемого объекта. Кроме того, вакуумные присоски используются в случае работы с плоскими объектами.

Для высвобождения объектов давление в пневмокамере корпуса 8 выравнивается с атмосферным, упругие элементы 10 уменьшают поперечный размер пальцев 2 до исходного, т. е. происходит расфиксация последних, отключается вакуум, и пальцы под действием собственного веса при подъеме захватного устройства занимают исходное положение, опираясь при этом буртиками 9 на стенку 3 корпуса 8 устройства.

Таким образом, по величине утапливания пальцев можно судить о характере и конфигурации наружных поверхностей захватываемого объекта, а также о пространственном положении, занимаемом объектом перед его захватом. Для количественной оценки геометрических параметров захватываемых объектов пальцы снабжаются датчиками линейных перемещений (потенциометрическими, растровыми, емкостными и т. п.), фиксирующими ход каждого пальца в процессе его

утапливания при захвате объекта. При этом воссоздается геометрический образ захватываемого объекта, представляющий собой совокупность электрических (или другого рода) сигналов, обработка которых системой распознавания ПР позволяет однозначно судить о принадлежности объекта к определенному классу, а также определять занимаемое им пространственное положение.

Захватные устройства с техническим зрением. Информационное поле оцувствленных ЗУ может быть организовано как набором утапливаемых пальцев, снабженных преобразователями линейных (угловых — при наличии изгибающих моментов в процессе захвата объектов)

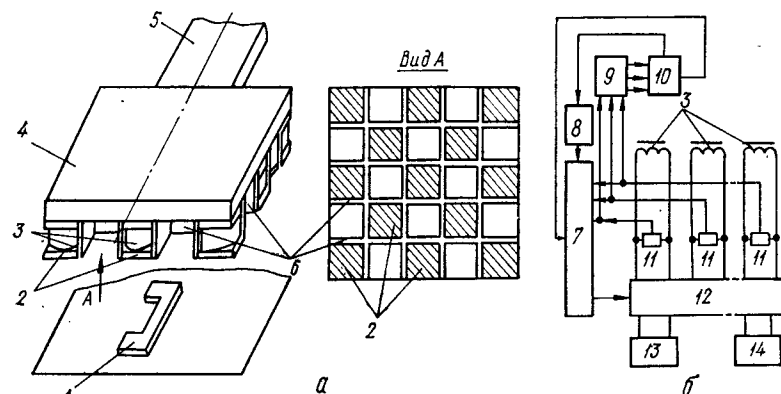


Рис. 6.4. Захватное устройство с информационным чувствительным полем:  
а — общий вид; б — функциональная схема

перемещений, так и с помощью расположенных определенным образом магнитопроводов при работе с объектами из ферромагнитных материалов. В этом случае информационное поле выполняет функции ЗУ, обладающего техническим зрением [11].

Захватные устройства данного класса распознают ориентированное положение объектов в момент поиска и захвата и формируют программу на переориентирование объектов в процессе их транспортирования к рабочей позиции. Эти свойства ЗУ могут быть обеспечены, если информационное поле последних выполнено в виде системы чередующихся, например, в шахматном порядке, магнитопроводов снабженных индивидуальными электрическими обмотками и датчиками наличия объектов. Правильно выбранный и организованный состав элементов системы информационного обеспечения включает банки образов номенклатуры 9 и устойчивых различных положений 10 объектов и логическую схему формирования программы переориентирования объектов в процессе их транспортирования к рабочей позиции.

Захватное устройство с информационным полем, а также структурная схема системы питания и управления его работой в режимах поиска, распознавания, захвата и переориентирования объекта показаны на рис. 6.4, а, б.

Информационное поле располагается на корпусе 4 захватного устройства, крепится к руке 5 манипуляционной системы ПР и представляет собой систему чередующихся и расположенных в шахматном порядке магнитопроводов 2, снабженных индивидуальными обмотками 3 и разделенных экранирующими элементами 6. Каждая секция электрических обмоток магнитопроводов содержит датчик 11 (рис. 6.4, б) наличия объекта, связанный электрически с системой управления 7 ПР и с входом банка образов номенклатуры объектов 9. В свою очередь, банк образов объектов 9 соединен с банком образов 10 различных устойчивых положений объекта. Последний связан с логической схемой 8 формирования программы переориентирования объекта, которая поступает в систему управления ПР. Питание обмоток магнитопроводов осуществляется от источников переменного 13 и постоянного 14 тока через коммутирующее устройство 12 изменения режимов работы индивидуальных обмоток, причем программа работы коммутирующего устройства регламентируется системой управления 7.

Захватное устройство работает в следующих режимах.

*Режим поиска.* В исходном состоянии все обмотки 3 магнитопроводов 2 отключены от цепей питания, и контакты коммутирующего устройства 12 изменения режима работы обмоток разомкнуты. Входные каналы банка 10 образов объектов зашунтированы системой управления 7.

По сигналу системы управления промышленным роботом на поиск объекта срабатывает коммутирующее устройство 12 и соединяет группу электрических обмоток магнитопроводов, расположенных в центральной части корпуса 4 захватного устройства, с источником питания 13 переменного тока. Рука 5 ПР начинает осуществлять сканирующие движения автопоиска области расположения объектов, причем закон сканирующих движений определяется системой управления 7 ПР. Когда в процессе поиска под системой включенных (центральных) магнитопроводов окажется ферромагнитный объект 1, магнитные силовые линии замкнутся через него, и сопротивление магнитных цепей магнитопроводов уменьшится. Изменение падения напряжения на обмотках 3, подключенных к источнику питания 13, фиксируется датчиками 11 наличия объекта. На выходе датчиков формируются сигналы, поступающие в систему управления 7 для прекращения сканирующего движения.

*Режим распознавания.* С поступлением от датчиков 11 сигнала о наличии объекта в области информационного поля система управления подает команду на коммутирующее устройство 12 на подключение обмоток 3 всех магнитопроводов 2 информационного поля к источнику питания 13 переменного тока. Теперь сигналы с датчиков не воспринимаются системой управления и поступают на входы банка 9 образов номенклатуры объектов, где осуществляется поиск образа, соответствующего классу распознаваемого и расположенного под захватным устройством объекта 1. После решения устройством 9 задачи идентификации образа объекта определяется его пространственное расположение. Так как объекты могут находиться в зоне захвата в нескольких устойчивых различных положениях, после identifica-

ции образа банк 9 образов номенклатуры объектов осуществляет коммутацию каналов выходов датчиков 11 на входы банка 10 образов различных устойчивых положений идентифицированного объекта на позиции захвата.

После решения банком 10 задачи идентификации положения находящегося на позиции захвата объекта данные об объекте поступают в логическую схему 8 формирования программы переориентирования объекта 1. По окончании формирования программа передается в систему управления 7 ПР, которая формирует команду коммутирующему устройству 12 на отключение индивидуальных электрических обмоток 3 магнитопроводов 2 от цепи источника питания 13 переменного тока.

*Режим захвата и переориентирования объектов.* По сигналу от системы управления 7 коммутирующее устройство 12 подключает все или необходимую для захвата находящегося в определенном устойчивом положении объекта группу обмоток 3 магнитопроводов 2 к источнику питания 14 постоянного тока. Объект 1 притягивается под действием магнитных сил к включенным магнитопроводам, и по сформированной логической схемой 8 программе переориентирования объекта система управления формирует необходимые сигналы на приводные устройства манипуляционной системы ПР для выполнения последней ориентирующих движений захватного устройства. Одновременно объект транспортируется (переносится) на рабочую позицию. По окончании транспортирования и переориентирования объекта в требуемое положение по команде системы управления 7 коммутирующее устройство отключает обмотки от источника питания 14 постоянного тока. Объект освобождается и располагается в требуемом ориентированном положении на рабочей позиции.

Цикл работы ЗУ на этом заканчивается, обмотки 3 обесточиваются, банк 10 образов различных устойчивых положений объектов шунтируется системой управления, и захватное устройство возвращается манипуляционной системой в исходное положение.

В описанном ЗУ отсутствуют подвижные элементы, что повышает надежность работы ПР в целом. При этом совмещение функций захвата с распознаванием образа объекта и формированием программы его переориентирования по результатам работы информационной системы значительно расширяет технологические и функциональные возможности подобного класса адаптивных ЗУ.

На рис. 6.5, а и б схематически показаны элементы осязательного ЗУ робота, осуществляющего поиск, опознавание положения и захват детали (в данном случае валика), как угодно расположенной в заданной зоне пространства ЗУ. ЗУ включает колодку 1 с укрепленными на ней двумя чувствительными элементами (тактильными датчиками) 2. Колодка может перемещаться вдоль осей X и Y и поворачиваться относительно осей Y и Z. Таким образом, колодка обладает четырьмя степенями свободы, которые позволяют ЗУ самоустановиться по как угодно размещенной в пространстве детали. На колодке размещены подвижные вдоль осей штыри 3 с лапками 4 на концах. Штыри могут сходиться и расходиться.

Опознающие чувствительные элементы представляют собой бесконтактные органы-датчики (фотоэлектрические, пневматические, радиоизотопные, индуктивные, ультразвуковые и др.). Поскольку положение захватываемого валика 5 (рис. 6.5; б) может быть произвольным и случайным, положение чувствительных элементов 2 относительно валика для каждой очередной операции захвата совершенно различное.

Рассмотрим процесс приведения ЗУ в требуемое положение. Предположим, что валик занимает в пространстве относительно системы

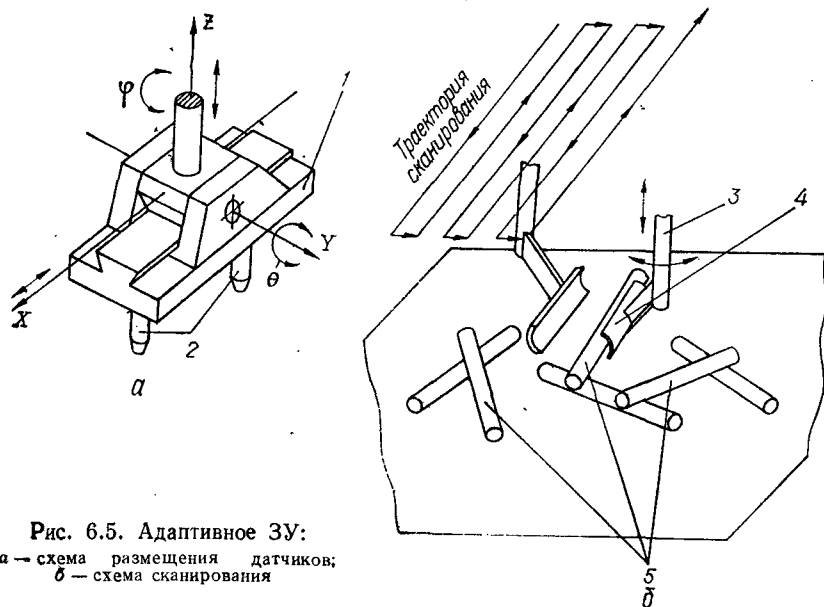


Рис. 6.5. Адаптивное ЗУ:

а — схема размещения датчиков;  
б — схема сканирования

координат  $XYZ$  показанное на рис. 6.6, а положение. Это положение относительно указанной системы определяется тремя координатами  $x_c, y_c, z_c$  центра тяжести  $C$  детали и тремя углами, образованными осью валика со всеми осями координат. Примем, что ось вращения  $O_M O_M$  колодки проходит через центр  $C$  тяжести валика. Для захвата валика необходимо, чтобы угол  $\varphi$ , образованный проекцией  $O_r O_r$  оси вала  $O'O'$  на плоскость  $XOY$  и линией  $DD$ , проходящей через проекции осей чувствительных элементов на плоскость  $XOY$ , был равен нулю. Кроме того, должен быть равен нулю угол  $\theta$ , образованный осью  $O'O'$  и нижней плоскостью  $\Pi$  колодки. В этих условиях чувствительные элементы ЗУ будут ориентированы вдоль образующей валика. Необходимо также, чтобы расстояние между осью вала и плоскостью  $\Pi$  ЗУ было вполне определенным.

Таким образом, для ориентации ЗУ относительно захватываемой детали необходимо: определить область расположения центра тяжести  $C$  валика и разместиться над ним; определить случайным углом  $\varphi$  и свести его к нулю или к  $180^\circ$ ; определить и свести к нулю также слу-

чайный угол  $\theta$ ; определить и достигнуть требуемое расстояние  $h$  (рис. 6.6, б). Для этого одновременно над массивом деталей движется ЗУ и вращается колодка (сканирует по заданному наперед закону) (см. рис. 6.5, б). В некоторый момент колодка (она изображена на рис. 6.6, в), перемещаясь в направлении сканирования СК, разместится над одним из валиков так, как показано на рисунке. Система управления ЗУ выполнена так, что из всех сигналов, поступающих

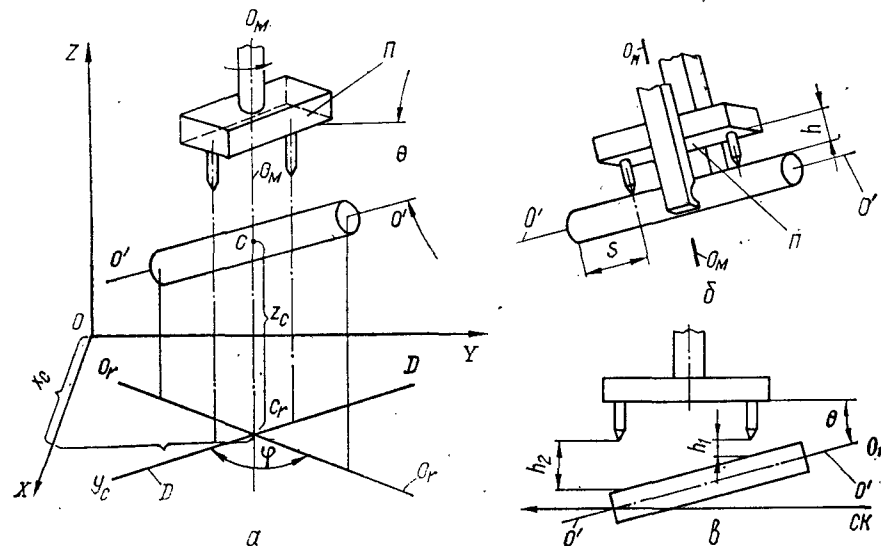


Рис. 6.6. Элементы реализации алгоритма поиска деталей:

а — относительное расположение деталей и захватного устройства; б — начало захвата деталей; в — угловое рассогласование детали и ЗУ

с чувствительных элементов, она выделяет только те, которые поступают на оба чувствительных элемента одновременно. Очевидно, что в таком случае угол  $\varphi = 0$  (или  $180^\circ$ ), т. е. оси чувствительных элементов пересекают ось  $O'O'$  валика (рис. 6.6, а).

В тот момент, когда чувствительные элементы выработали одновременно управляющие сигналы, вращение колодки прекращается. При этом ЗУ ориентируется вдоль проекции  $O_r O_r$  оси  $O'O'$  вала. В то же время включается привод, перемещающий колодку с чувствительными элементами вдоль оси  $X$  (см. рис. 6.5, а). Это движение позволяет избежать ложных срабатываний ЗУ, так как на чувствительные элементы поступили одновременно два сигнала от двух разных деталей. В подобном случае перемещение колодки вдоль оси  $X$  приведет к тому, что сигналы с обоих чувствительных элементов уменьшатся. В силу такого сочетания обоих сигналов система управления переведет ЗУ на поиск нового валика, т. е. вернется в начало отработки алгоритма захвата неориентированной детали.

Как отмечалось, при выходе ЗУ на валик устройство управления фиксирует схват в положении, когда угол  $\varphi = 0$ . Кроме того, фикси-

руются также амплитуды одновременно поступающих на чувствительные элементы сигналов. Так, на рис. 6.6, в показано положение, когда с правого чувствительного элемента поступает больший сигнал, чем с левого. Это объясняется тем, что расстояние  $h_1 < h_2$ .

Разница в сигналах характеризует собой значение угла  $\theta$ , который устраняется поворотом колодки вокруг оси  $Y$  (см. рис. 6.6, а). Этот поворот происходит до того момента, пока сигналы с обоих чувствительных элементов не станут равными по значению, т. е. пока  $h_1$  не станет равным  $h_2$ . Последнее означает, что угол  $\theta$  также будет сведен к нулю. Затем устанавливается требуемое расстояние  $h$  от колодки до валика перемещением первой вдоль оси  $Z$ .

Для расположения оси  $O_m O_m$  по центру  $C$  валика, т. е. для захвата его посередине, захватное устройство с колодкой перемещаются вдоль оси валика до тех пор, пока один из чувствительных элементов не выйдет на край последнего. Это положение отмечается резким уменьшением сигнала, вырабатываемого чувствительным элементом. После этого двигатель, перемещающий колодку вдоль оси  $O'O'$ , реверсируется и перемещает ее назад на расчетное расстояние  $s$  (см. рис. 6.6, б), которое определяется уставкой, вводимой в систему управления. Поэтому ось  $O_m O_m$  ЗУ с колодкой будет находиться от любого торца валика на расстоянии  $1/2 L$ , где  $L$  — его длина. На этом процесс ориентирования ЗУ заканчивается, и последнее зажимает валик, перенося его на рабочую позицию, например, позицию сборки. После этого цикл работы манипулятора повторяется.

В случае, если два валика располагаются вплотную друг к другу вдоль одной оси, колодка проходит расстояние, большее расстояния  $s$ , и останавливается, ожидая команды на новую попытку захвата другого валика.

В качестве чувствительных элементов могут использоваться фотометрические устройства, размещаемые вдоль торца колодки. В зависимости от угла  $\theta$  смещения оси валика  $O'O'$  и расстояния  $h$  между валом и колодкой (см. рис. 6.6, в) будут засвечиваться те или иные фотоэлементы. При условии, что угол  $\theta = 0$ , будут засвечиваться одновременно фотоэлементы, равноудаленные от оси  $O'O'$ . Фиксацией положения колодки достигается требуемое положение ЗУ относительно захватываемого валика.

## Глава VII

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

#### 1. ИЕРАРХИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПР

Различают [26, 66, 69] пять уровней управления роботами (рис. 7.1). На I, нижнем, уровне, представляющем управление исполнительной системой приводов ПР, реализуется управление по отдельным функциональным степеням подвижности робота. Именно на дан-

ном уровне учитываются динамические и точностные свойства ПР. Совместно со II уровнем I уровень управления представляет систему локального управления ПР, в задачи которого входит расчет управляющих воздействий (уровень II), поступающих на исполнительный I уровень, и реализация, таким образом, программного управления приводами. Кроме вычисления управляющих воздействий, на II уровне управления осуществляется пересчет координат позиционирования рабочих органов ПР из трехмерного пространства (в котором задается их перемещение) в пространство характеристических координат, а также формирование траектории движения рабочих органов ПР в трехмерном пространстве. Таким образом, на II уровне реализуется

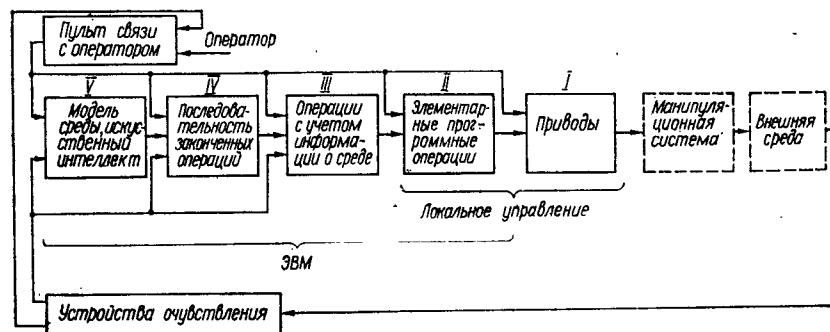


Рис. 7.1. Иерархическая структура управления ПР

первый принцип управления — простое управление по жесткой программе, и если не требуется увязки данной программы с работой внешнего оборудования, то функции II уровня сводятся к хранению и распределению программных уставок.

В отличие от II уровня, на III уровне синтезируется управление с учетом информации о внешней среде. В совокупности с управлением по жесткой программе (II уровень) данные III уровня вносят коррекцию в жесткое программирование с учетом состояния внешней среды и самого робота на основании информации от соответствующих устройств очувствления робота. Как и на II уровне, на III уровне также реализуются алгоритмы выполнения элементарных типовых операций, в связи с чем ряд управляющих воздействий с этого уровня может непосредственно поступать на вход I уровня, минуя II. Поэтому по характеру реализации технологических операций II и III уровни могут быть объединены в уровень синтеза элементарных типовых операций. Таким образом, на III уровне реализуется второй принцип управления роботами — управление в функции от состояния внешней среды (или принцип адаптивного управления).

Если требуется задать программу в виде наименования операций или их последовательности, используется IV уровень, на котором синтезируются законченные сложные действия по достижению конкретной конечной цели управления, в частности, сварки изделия. Для этого на данном уровне производится членение операции управления

на ряд технологических переходов, реализуемых нижним уровнем управления ПР (например, ориентирование сварочной головки, формирование режимов относительного перемещения рабочих органов, расчет траектории перемещения, контроль качества сварного шва и др.). На данном уровне используется информация от устройств о чувствления ПР о состояниях его исполнительных систем и внешней среды для коррекции планов действия, формируемых на более высоком уровне управления. При этом синтез и коррекция траектории перемещения может производиться как до начала, так и в процессе работы ПР, связанной с выполнением или обслуживанием технологической операции. В алгоритмическое обеспечение IV уровня входит разложение заданных планов действия на элементарные типовые операции для II и III уровней с использованием методов эвристического программирования, лингвистических методов, а также диалогового общения с оператором на проблемно-ориентированном языке. Диалоговый режим используется, в частности, при недостаточном объеме информации для выполнения заданного предписания действий ПР.

На V уровне производится анализ информации, поступающей в виде заданий от оператора, и обработка данных от средств сбора информации о внешней среде, а также моделируется внешняя среда, в результате чего можно планировать действия ПР с учетом прогнозирования изменения состояния среды. Модель среды в процессе функционирования системы управления роботом может совершенствоваться, если построить формальные структуры — пространства состояний, деревьев целей. Кроме специальных задач, которые предписываются для выполнения промышленному роботу, на V уровне управления обеспечиваются условия функционирования всех подсистем робота — надежность работы манипуляционной, информационной систем и системы управления, последовательность работы отдельных элементов, самосовершенствование алгоритма работы; это происходит за счет централизованного контроля подсистем робота в виде программных тестов. На этом уровне общение с оператором осуществляется в диалоговом режиме на ограниченном естественном языке; при наличии соответствующих алгоритмов распознавания возможно речевое управление роботом.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПР

Основными классификационными признаками систем управления являются [30]: способ управления движением; тип сигналов в управляющем устройстве; количество совместно управляемых роботов; характер участия в управлении оператора; тип программноносителей; способ программирования.

Характер выполняемых операций, степень специализации, степень подвижности, количество степеней подвижности, грузоподъемность, способ управления, число совместно управляемых ПР и способ программирования определяют перечень функциональных характеристик ПР; типы устройства передвижения, компоновки, привода, используемых сигналов в системе управления и программноносителей памяти определяют перечень конструктивных характеристик ПР.

По способу управления движением системы подразделяются на системы управления по программе, по функции состояния внешней среды и комбинированные, в которых используются оба способа.

Большинство ПР, находящихся в эксплуатации, являются роботами с программным управлением, в которых программа задается либо в форме готовых для отработки приводами траекторий для каждой из координат манипуляционной системы, либо в виде траекторий в координатах рабочей зоны, которые затем преобразуются в реальном режиме времени в координаты степеней подвижности манипуляционной системы робота. Возможно также задание программы в виде указания наименования типовой операции или последовательного перечня таких операций (см. IV уровень управления на рис. 7.1). При этом в зависимости от типа привода соответствующей управляемой координаты отработка движения может быть как непрерывной (*контурные* системы управления), так и дискретной (*позиционные* системы). В первом случае программа реализуется в виде непрерывной траектории, во втором — в виде конечной последовательности позиций, заданных программой.

Системы, в которых число программируемых точек по каждой из управляемых координат ограничено несколькими фиксированными значениями, включая начальную и конечную точки позиционирования, являются цикловыми и представляют собой частный случай позиционных систем управления. Позиционные системы управления используются в операциях, требующих лишь позиционирования объекта с заданной точностью, т. е. ориентированного его расположения в ограниченном числе точек пространства. При этом неважно, по какой траектории будут перемещаться рабочие органы ПР (следовательно, и транспортируемый объект) между заданными позициями. К таким операциям относится большинство операций транспортирования объекта или обслуживания стационарного оборудования. При этом позиционной системой обеспечивается логическая последовательность программы и ее распределение по приводам управляемых координат манипуляционной системы робота.

Позиционное управление неприемлемо для исполнительных ПР, выполняющих операции нанесения защитных покрытий, газовой резки, дуговой сварки и другие, где требуется выдерживать непрерывную траекторию перемещения инструмента с заданной скоростью движения. В этих случаях используются системы контурного управления, которые позволяют непрерывно управлять перемещением инструмента, ориентацией объекта и параметрами технологического оборудования. Контурное управление можно представить как синхронное позиционное управление с большим числом программируемых и расположенных близко друг от друга точек позиционирования. Однако при таком управлении можно программировать только опорные точки воспроизводимой траектории, а промежуточные определяют интерполированием с помощью специальных логических устройств — линейных или круговых интерполяторов. В этом случае рабочие органы ПР будут перемещаться по сглаженной кусочно-непрерывной траектории. Таким образом, можно применить позиционную систему управления с интер-

полятором, и процесс обучения ПР с такой системой управления практически мало отличается от процесса обучения ПР без интерполятора.

В тех случаях, когда по отдельным степеням подвижности ПР используются разные типы систем управления, применяются *смешанные системы контурно-позиционного типа*. К таким системам относятся системы контурного управления по основным координатам регионального перемещения и позиционного управления ориентацией (локальное перемещение) объекта и технологическими параметрами. В тех случаях, когда для основных технологических операций требуется применить контурное управление, а для вспомогательных (ввод и вывод инструмента в рабочую зону, комплектация сборочного соединения и др.) — позиционное, используются *комбинированные системы управления*.

В зависимости от степени адаптации к изменениям внешней среды различают системы неадаптивного управления в функции состояния внешней среды, системы адаптивного управления и управления с искусственным интеллектом.

В системах *неадаптивного управления* алгоритм управления в течение всего процесса автоматической работы ПР остается без изменения. В частности, такое управление применяется при обработке (сборке) нескольких моделей одного и того же изделия с небольшими отличиями в конструкции, когда в системе управления предусматривается запись и коммутация нескольких подпрограмм, каждая из которых рассчитана на определенную модель изделия. Вызов необходимой программы обеспечивается автоматически после завершения обработки (обслуживания) очередного изделия. Такой алгоритм работы ПР в рамках выбора подпрограммы не является адаптивным, но позволяет учесть изменения в состоянии среды (в данном случае изменения в модели изделия).

В системах *адаптивного управления* структура или параметры автоматически изменяются во времени либо для сохранения качества управления, либо для его усовершенствования в процессе накопления опыта. К таким системам можно отнести системы управления, обеспечивающие оптимальные условия взаимодействия системы «робот — объект — среда», в частности, при выполнении сборочных операций\*.

Для ПР с элементами адаптации, кроме команд, регламентирующих движение рабочих органов ПР, система управления может формировать также команды на определение наличия предметов труда на исходной позиции, принадлежности их к определенному классу объектов, отсутствие брака и соответствие техническим характеристикам и параметрам; также могут формироваться команды на изменение усилий захвата объектов, отключение отдельных исполнительных звеньев в случае возникновения перегрузок в последних и др. Все данные о состоянии предметов труда и ходе выполнения транспортных, манипулирующих движений и технологических операций (для технологических ПР) формируются сенсорными устройствами внутренней и внеш-

ней информации информационной системы. Априорно в таких ПР задается лишь алгоритм обработки этих данных.

К наиболее совершенным относятся *системы с искусственным интеллектом*, которые обеспечивают автономное функционирование робота в соответствии с поставленными в самом общем виде целями в условиях максимальной неорганизованности среды и нестандартных ситуаций, когда заранее невозможно предусмотреть оптимальное решение. Таким образом, для интеллектуальных роботов разрабатывают алгоритмы общего функционирования, такие, например, как «прочитать сборочный чертеж», «определить принадлежность (типовость) сборочного соединения», «выбрать характерную для данного соединения последовательность сборки», «изучить состав, принадлежность и относительное положение в пространстве комплектующих элементов на исходной позиции», «сформировать алгоритм (алгоритмы) комплектации соединения», «проверить характеристику соединения» и т. д. Однако функции формирования частных (цикловых) алгоритмов работы, в том числе и обращение к внешней памяти, принятие (выбор типовых) решений, стратегии поиска элементов сопряжения в соответствии с выбранным алгоритмом сборки остаются за роботом. Кроме того, такие роботы могут улучшать в процессе накопления «опыта» общий алгоритм, который был задан в начале работы. Системы с искусственным интеллектом постоянно совершенствуют алгоритм своей работы на основании данных о состоянии внешней среды, строят динамическую модель внешнего мира с учетом перспективы ее развития и по результатам прогнозирования вырабатывают план действий. Роботы, оснащенные такими системами, работают в автоматическом режиме. При подключении на определенных этапах работы интеллекта оператора управление роботом становится *автоматизированным*.

Отличительные признаки простейших роботов с жестким программным управлением, адаптивных и интеллектуальных приведены в табл. 7.1.

7.1. Основные отличительные признаки роботов

Тип робота	Биологический аналог	Решаемая задача	Обслуживаемая среда	Объем и источник информации
С жестким программным управлением	Рука	Обслуживание	Детерминированная по наличию, положению и качеству объектов	Жесткая программа: координаты положения рабочих органов
Адаптивные	Глаз—рука	Обслуживание, частичная фиксация	Детерминированная по положению объектов	Жесткая программа, элементы обратной связи, координаты положения рабочих органов, усилия захвата
Интеллектуальные	Глаз—мозг—рука	Сборочные операции	Недетерминированная	Внешняя память, чертеж, окружающая среда, типовые решения, стратегия и др.

\* Методы адаптивного управления сборкой рассматриваются в гл. X.

По типу сигналов в управляющем устройстве различают системы непрерывного (аналогового), дискретного (цифрового) и аналого-цифрового управления. В *системах непрерывного действия* все звенья имеют непрерывные входные и выходные сигналы. В этих системах вся информация запоминается и воспроизводится в виде амплитуд и фаз напряжений. В *системах дискретного действия* хотя бы одна величина должна представлять дискретный сигнал. В цифровой системе управления ПР оперируют с информацией в дискретной форме.

При использовании *аналого-цифровой системы* система управления приводами ПР является аналоговой, а датчики обратной связи — цифровыми; кроме того, в таких системах используются цифровые запоминающие устройства. Такое распределение функций между аналоговыми и цифровыми элементами позволяет наилучшим образом использовать преимущества как цифровых, так и аналоговых систем управления.

По количеству совместно управляемых роботов системы управления делятся на системы индивидуального и группового управления.

При *индивидуальном управлении* каждый из ПР имеет систему локального управления (конструктивно выполняется в виде стойки управления), задачей которой является координация действий отдельных функциональных элементов робота друг с другом и с обслуживаемым технологическим оборудованием, подводщими и отводящими транспортными системами, технологической оснасткой и средствами упорядочения объектов роботизации, с которыми взаимодействует ПР. Как правило, для обеспечения оптимальных условий взаимодействия системы индивидуального управления ПР с системами управления технологическим оборудованием, транспортными системами и другими требуются дополнительные средства сопряжения, которые позволяют согласовать физическую природу сигналов и их абсолютные значения, используемые в системах управления ПР, с другим оборудованием, входящим в состав РТС.

При *групповом управлении*, которое может быть централизованным, децентрализованным и комбинированным, осуществляется синхронизированное управление группой ПР и технологическим оборудованием от одного управляющего устройства (чаще всего от ЭВМ). Каждый робот при этом может иметь свою локальную систему управления (стойку), которая представляет нижний уровень управления (децентрализованное управление). Однако в последнее время все шире используется прямое групповое управление ПР, связанным единым технологическим процессом изготовления изделия, от ЭВМ (мини-ЭВМ). При этом значительно повышается надежность функционирования всего комплекса, однако, для согласования сигналов, поступающих от ЭВМ, с исполнительными приводами ПР, требуются устройства сопряжения в виде АДП, ЦАП и др. Такое централизованное управление предусматривает иерархию самих роботов по выполняемым ими функциям, т. е. возможно деление роботов на группы, внутри которых один из них централизованно управляет (синхронизирует работу) другими роботами данной группы. В свою очередь, все группы вместе со своими ведущими роботами входят в общую централизованную систему управ-

ления. При таком алгоритме работы группу может представлять один робот со своей локальной системой управления.

По характеру участия в управлении человека-оператора системы управления ПР делятся на автоматические и автоматизированные.

*Автоматические системы* управления ПР обеспечивают любой режим его работы без участия человека. Такое управление, например, обеспечивают системы управления по программе. В *автоматизированных системах* управления наряду с автоматическим действием ПР часть функций управления на определенных этапах выполняет человек-оператор. Характер функций и уровень управления, на котором осуществляется подключение человека-оператора, позволяют выделить несколько модификаций автоматизированных систем управления ПР:

участие человека на самом нижнем уровне управления (рис. 7.1) в копирующем режиме с управлением от задающего манипулятора, в режиме настройки с управлением от кнопочного переключателя или выносного пульта управления, в режиме дублирования автоматического управления в аварийных ситуациях, а также в режиме обучения робота;

участие человека на промежуточных уровнях управления для расширения адаптивных возможностей робота, в системе управления которым не предусмотрены алгоритмы поведения при определенных внешних воздействиях (изменениях) среды;

участие человека на верхнем уровне управления, когда человек-оператор образует самостоятельный уровень управления всей системой автоматического управления ПР для расширения интеллектуальных возможностей робота за счет использования интеллекта человека.

В двух последних модификациях автоматизированных систем управления ПР с участием человека последним осуществляется визуальный контроль за отработкой роботом заданных управляющих воздействий и корректируется работа ПР, производится распознавание объектов роботизации, выполняется контроль за ходом роботизированного технологического процесса и за синхронизацией действий входящих в структуру РТС устройств. Такой метод совместного управления ПР называется супервизорным.

Супервизорный метод управления позволяет совместить вычислительные возможности ЭВМ при решении формализуемых задач с интеллектуальными возможностями человека при решении сложных неформальных задач. При разработке супервизорных методов управления требуются: четкое определение и разграничение функций между человеком и ЭВМ при взаимодействии с роботом и исследование возможностей человека-оператора в контуре системы супервизорного управления роботом; правильный выбор средств и методов сенсорного обеспечения роботов; разработка адаптивных алгоритмов управления. Алгоритмы управления ПР обеспечивают как реализацию типовых движений элементов манипуляционной системы робота (алгоритмы непосредственного расчета характеристических координат робота), так и коррекцию его действий в соответствии с поступающей от средств информационного (в том числе сенсорного) обеспечения информацией (алгоритмы оптимизации).

Основой алгоритмов непосредственного расчета являются соотношения между звеньями и характеристическими координатами руки робота, причем для манипуляционных систем с числом звеньев более трех для исключения избыточности их структуры накладываются ограничения (например, в виде задания ориентации ЗУ относительно рабочей плоскости, на которой робот выполняет рабочие операции). К преимуществам таких алгоритмов управления относится возможность вычисления характеристических координат элементов манипуляционной системы робота в заданной точке за одну итерацию; к недостаткам — неоптимальность получаемой траектории движения рабочих органов в заданную позицию и ограниченность применения данного алгоритма только для данной кинематической структуры робота.

В алгоритмах оптимизации рассогласование между исходным и заданным положениями рабочих органов манипуляционной системы рассматривается как целевая функция, которая имитируется в процессе управления роботом с учетом ограничений на ориентацию ЗУ. Преимуществами алгоритма оптимизации является обеспечение оптимальной траектории перемещения звеньев манипуляционной системы, однако при этом резко увеличиваются объем и время вычислений.

По типу программносителей системы управления подразделяются на системы с электромеханическими, магнитными, электронными и комбинированными носителями.

К электромеханическим относятся переналаживаемые упоры, конечные выключатели (путевые пороговые датчики, герконы и др.), штеккерные панели, декадные переключатели и т. п. Такие носители используются в цикловых и позиционных системах при ограниченных наборах команд в цикле.

Магнитные носители могут выполняться в виде магнитных лент, барабанов, дисков, сердечников, пленки. Используются в качестве оперативной памяти.

Электронные носители выполняются на полупроводниковых элементах, интегральных схемах и др. Используются в качестве массивов данных, представляющих собой программы расчета траекторий, типовые образы объектов, алгоритмы функционирования в нестандартных ситуациях и др.

По способу программирования можно выделить системы управления ПР с внешним программированием и с обучением.

При внешнем программировании исходная программа рассчитывается аналитически, в том числе с помощью ЭВМ, и заносится на программноноситель ПР. Существующие методы расчета траекторий основываются либо на оптимизации решения, либо на выборе одного из допустимых решений в рамках заданных ограничений.

Программирование ПР с обучением может предусматривать ручное обучение, когда перемещение рабочих органов манипуляционной системы осуществляется вручную, а конечные (характерные) точки траектории перемещения заносятся в программноноситель для дальнейшего автоматического воспроизведения. При полуавтоматическом обучении перемещение рабочих органов манипуляционной системы произ-

водится от пульта; для автоматизированного обучения характерно диалоговое общение с человеком и использование возможностей ЭВМ для расчета оптимальной траектории движения рабочих органов ПР.

### 3. ОБЩЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА С РОБОТОМ

В иерархической структуре управления роботом каждый из уровней управления для общения с более высоким или более низким уровнем имеет свой язык. Информация с одного языка на другой переводится трансляторами в соответствии с алгоритмами работы последних. Каждый вышестоящий уровень имеет более универсальный язык, так что его команда транслируется на более низком уровне в виде нескольких команд. На любом из уровней предусматривается возможность оперативного вмешательства человека-оператора, поэтому язык общения оператора с соответствующим уровнем (или на соответствующем уровне) должен обладать mnemonic свойствами, облегчающими усвоение оператором правил пользования языком, который, в свою очередь, должен быть ориентирован на класс задач, решаемых данным уровнем управления роботом.

На нижних уровнях управления общение сводится к режиму кодирования, т. е. человек-оператор формулирует задание роботу либо в виде уставок перемещений рабочих органов по соответствующим координатам (I уровень), либо в виде вектора скорости движения рабочего органа или его координат с помощью специальных задающих устройств (II и III уровни). Наличие сенсорных устройств на III уровне управления позволяет организовать двустороннее общение человека-оператора с роботом по тракту отражения (реакции) на управляющие воздействия, например, по нагрузке и ее составляющим при выполнении сборочной (сопряжение, свинчивание и др.) операции, по усилию зажима при захвате объекта и т. д. Таким образом, при наличии сенсорных устройств (III уровень) система управления роботом приобретает свойство адаптации, которая может осуществляться в автоматическом режиме и без участия человека-оператора. В автоматизированном режиме работы от сенсорных устройств на пульт связи оператора поступают сигналы о состоянии внешней среды (а в общем случае — и о состоянии самого робота). Используя эту информацию, человек-оператор принимает необходимое решение и вводит в систему управления корректирующую программу. Таким способом удается предотвратить возникновение аварийных ситуаций (в частности, перегрузок манипуляционной системы и столкновений с возможными препятствиями).

На IV уровне реализуется супервизорный метод управления. На этом уровне человек-оператор взаимодействует с роботом, формируя и выдавая директивные задания на проблемно-ориентированном языке, например, ЕНOS [27] и РОКОЛ [43]. Далее работа с роботом приобретает форму диалогового режима, когда директивные задания на проблемно-ориентированном языке трансформируются с помощью транслятора в соответствующие перемещения исполнительных устройств робота, а система управления запрашивает человека-оператора о

дополнительной недостающей информации для выполнения операции. Обмен информацией ведется как с использованием стандартных терминов ЭВМ (устройства ввода-вывода информации типа пишущая машинка, дисплей и т. п.), так и с помощью наиболее совершенного режима взаимодействия — речевого аппарата на естественном языке с ограниченным числом терминов и с контролем выполнения команд.

В отличие от IV уровня, на котором планируется операция и задается последовательность ее выполнения, на V уровне указывается только сама операция, а ее выполнение планируется самим роботом. Соответственно языки V уровня управления обладают меньшей определенностью для формирования задания и содержат меньшее число знаков для его формулирования. Наиболее простой язык высокого уровня — язык ЯДРО [26]. Операторы этого языка позволяют определить, что необходимо сделать для выполнения данной задачи, а за роботом оставляется стратегия ее решения, т. е. как задача должна выполняться.

Кроме проблемно-ориентированных языков для подачи команд роботу могут использоваться графические языки. Существует ряд графических языков для записи движений человека, которые с успехом могли бы применяться для аналогичных целей при управлении роботом. В частности, к таким языкам относятся кинетография, описывающая лишь те изменения положения тела человека (робота), которые не могут быть выведены из предыдущих символов кинетограммы, а также мотোগрафия, представляющая собой систему знаков для записи движений человека [26]. В случае их применения графическую запись движений целесообразно вводить в ЭВМ с помощью «светового пера».

Проблемно-ориентированные и графические языки, как правило, легко доступны для изучения, так как строятся на базе ограниченного естественного языка или идентифицированных с естественными положениями движущегося человека символами и позволяют сжато описывать действия, которые планируются для воспроизведения манипуляционной системы ПР.

#### 4. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПР

В каждом конкретном случае назначение робота и его технические характеристики (количество каналов управления, точность позиционирования и др.) определяют структуру системы управления и объем памяти программноносителя. Так, обслуживающие роботы с позиционной системой управления имеют средний объем памяти 100...200 слов, а с цикловой системой — 20...50 слов; исполнительные роботы (например, для окраски сложных поверхностей) с контурной системой управления — 1000...2000 слов. Другими важнейшими характеристиками запоминающих устройств систем управления ПР являются возможность неразрушающего считывания и перезаписи, а также стоимость.

В сравнительно простых ПР с цикловой системой управления величина перемещения задается с помощью регулируемых упоров, а последовательность перемещений — матричными клавишными или штеккерными переключателями и шаговыми реле. Командные сигналы на каждую из управляемых координат манипуляционной системы ПР по-

ступают от потенциометров, которые связаны с нижними продольными шинами матричного поля; поперечные шины матричного поля связаны с контактами шаговых реле и соответствуют отдельным переходам программы.

В позиционных системах управления последовательность величин и скоростей перемещения исполнительных органов манипуляционной системы ПР задаются в цифровом коде в виде совокупности чисел, записанных в электрических или пневматических запоминающих устройствах, аналогичных используемым в современной вычислительной технике. В системах контурного управления, кроме того, задается функциональная зависимость между скоростями движений исполнительных органов по каждой из управляемых координат.

При выборе типа запоминающего устройства для систем управления ПР следует учитывать специфику работы такого устройства при выполнении функций промышленным роботом, а именно:

информация считывается с запоминающего устройства ПР всегда в том же порядке и последовательности, в котором она была записана;

при воспроизведении программы в режиме рабочей отработки скорость считывания относительно невелика и определяется быстродействием исполнительных органов манипуляционной системы ПР при выполнении движений от одной позиции к другой;

считывание информации не должно разрушать последнюю ввиду многократного ее использования;

не допускается потеря информации при перерывах в питании ПР источником энергии с целью исключения аварийных ситуаций и случаев травматизма при возобновлении питания.

Емкость запоминающего устройства определяется объемом информации, который необходим для записи заданного количества позиций и управления обслуживаемым оборудованием и рассчитывается по формуле [24]

$$Q = N \sum_{k=1}^n \log_2 \frac{l_k}{\Delta l_k},$$

где  $N$  — количество точек позиционирования;  $n$  — число управляемых координат;  $l_k$  — диапазон по  $k$ -й координате;  $\Delta l_k$  — величина дискретности по  $k$ -й координате.

После определения емкости дальнейшая конкретизация при выборе типа запоминающего устройства производится с учетом его надежности и стоимости. В качестве программноносителей могут использоваться различные запоминающие устройства: перфоленточные фотосчитыватели, магнитные ленты, барабаны, диски, цилиндрические пленки; твердотельные носители информации; аналоговые запоминающие устройства на потенциометрах. На приведенной гистограмме (рис. 7.2, а) показано распределение действующих роботов по типу запоминающего устройства. Как видно из гистограммы, наиболее распространены в настоящее время ПР, у которых программа задается с помощью штеккерных и кнопочных матричных полей (В). В последние годы

в качестве запоминающих устройств широко применяются устройства на магнитных элементах (А), что связано, с одной стороны, с усложнением функций ПР, а с другой, — повышением надежности работы и снижением стоимости таких носителей информации. Усложнение функций, в частности, обусловлено стремлением увеличить число каналов синхронизации работы ПР со вспомогательными устройствами робототехнологического комплекса. Для простых редко переналаживаемых циклов в качестве программноносителей используются кулачки, упоры и т. п. (С). Гистограмма распределения роботов по числу каналов связи показана на рис. 7.2, б.

Примером простейшего запоминающего устройства, выполняющего также функцию программно-задающего устройства для цикловых

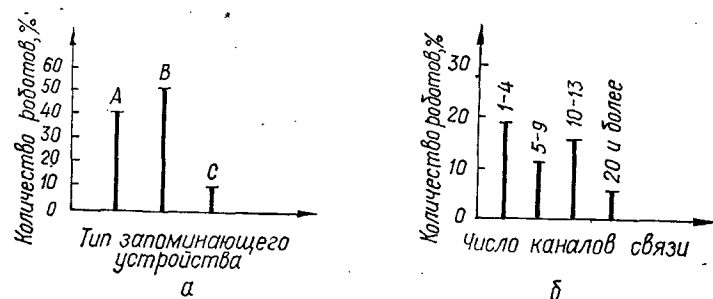


Рис. 7.2. Гистограммы распределения роботов по типу запоминающего устройства (а) и числу каналов связи (б):

А — электронная (магнитная) память; В — штреккерные (наборные) поля; С — кулачки, упоры и т. д.

систем управления, могут служить декадные аналого-числовые переключатели (рис. 7.3, а), соединяемые в секции и предназначенные для выдачи управляющих сигналов на исполнительные устройства робота. Валы роторов каждой из секций связаны согласующими механическими передачами с подвижными элементами исполнительных устройств соответствующих управляемых координат ПР, а выходные контакты статора — со входами управляющих устройств по каждой из координат робота. Задание по управляемым координатам отрабатывается до тех пор, пока вал ротора соответствующего декадного переключателя не установит связанный с ним подвижный контакт в положение, характеризующее задание на отработку.

Программоноситель барабанного типа, на тросовом барабане 1 которого в зависимости от требуемой последовательности и продолжительности работы исполнительных устройств (ИУ) управляемых координат ПР устанавливаются (процесс программирования) переключки 2, схематично показан на рис. 7.3, б. При вращении барабана 1 от приводного двигателя 3 переключки утапливают контакты 4 в моменты, обусловленные программой действия соответствующего ИУ управляемой координаты ПР. Время выдержки сигнала определяется периодом включения контакта 4, что в свою очередь зависит от длины переключки 2. Барабан 1 представляет собой две гибкие ленты 6, натя-

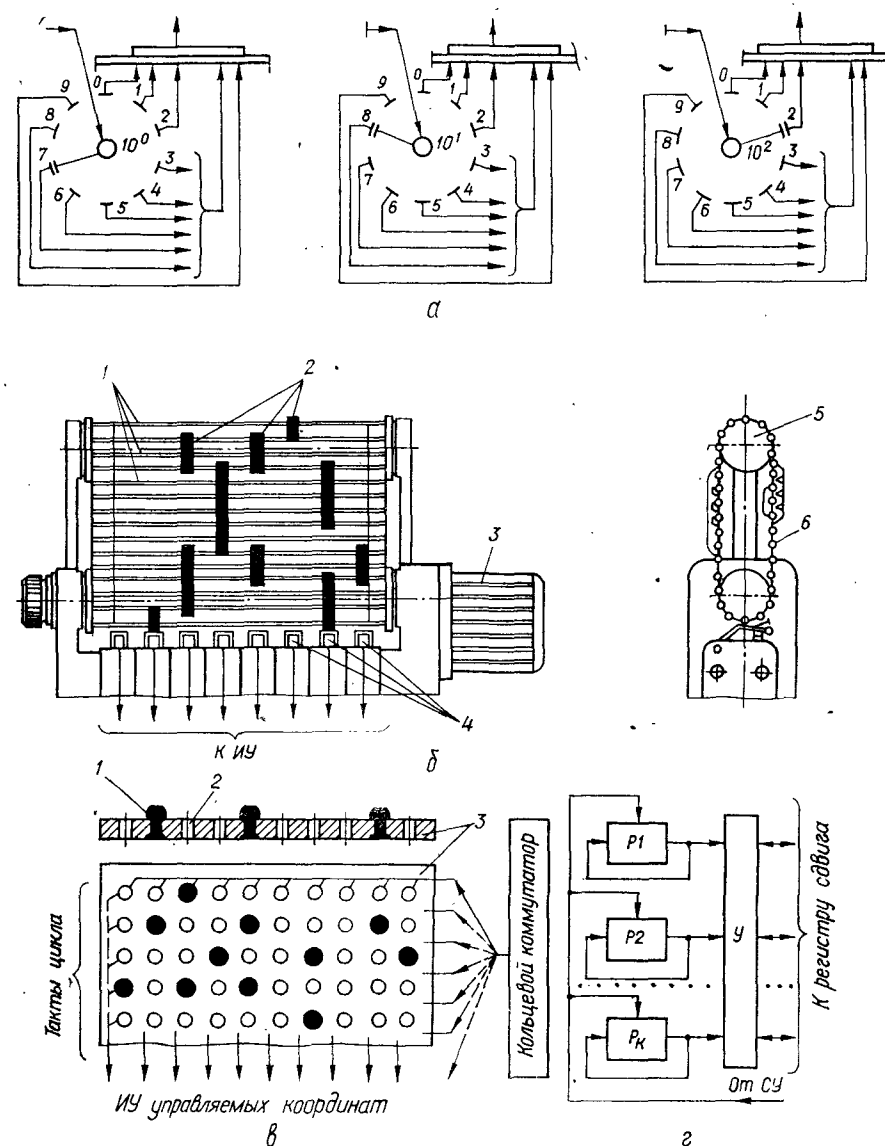


Рис. 7.3. Программно-задающие устройства:

а — декадные аналого-числовые переключатели; б — барабанные; в — магнитные; г — на регистрах сдвига

нутые по краям на ролики 5 и соединенные между собой рейками для закрепления на последних переключки 2. Контактная группа 4 может коммутировать электрические либо пневматические сигналы. Таким образом, по горизонтали считывается один такт цикла управления,

огда как вращение барабана на один оборот характеризует полный цикл управления ПР.

Развернув барабан в плоскости, получаем программноноситель матричного типа (рис. 7.3, в), в котором цепи коммутируются штеккерами. Наличие штеккеров 1, установленных в коммутационных гнездах 2 панели 3, свидетельствует о потенциальной возможности посылки управляющего сигнала в соответствующее ИУ управляемой координаты ПР при поступлении на горизонтальную шину опрашивающего импульса от кольцевого коммутатора. Горизонтальные шины штеккерной панели соответствуют такту цикла управления, а полный набор горизонтальных шин — циклу управления ИУ робота. Количество тактовых (опрашивающих) импульсов кольцевого коммутатора должно быть не меньше числа тактов цикла управления роботом, а последовательность их поступления на шины и их длительность определяются циклограммой работы ИУ.

Значительно большими возможностями обладают перспективные твердотельные или полупроводниковые запоминающие устройства, выполненные на базе микросхем средней и выше степени интеграций. Для ПР с асинхронным режимом работы наиболее применимы в качестве запоминающих устройств наборы статических регистров сдвига на МДП-транзисторах или матрицы статических элементов памяти на этих же транзисторах [51]. Структура запоминающего устройства на регистрах сдвига (рис. 7.3, г) включает набор статических сдвиговых регистров  $R$ , выполненных на цилиндрических магнитных пленках и работающих на буферные усилители  $У$  считывания и записи. Работа устройства заключается в следующем. С поступлением очередного импульса от системы управления СУ, свидетельствующем об окончании предыдущего такта управления, находящаяся в регистрах информация сдвигается на одну ячейку, и с выходных ячеек на буферные усилители выдается очередное число, соответствующее такту управления. Для исключения утечки информации после обработки очередного такта управления регистры снабжены каналом перекачки информации с выходных ячеек регистров (по мере ее передачи на буферные усилители) на входные. Запись информации в регистры сдвига осуществляется в обратном порядке — от регистра числа через буферные усилители на выходные ячейки регистров  $R$  сдвига. Таким образом, число регистров сдвига соответствует количеству ИУ управляемых координат ПР и технологических команд в каждом такте управления, а число ячеек в регистрах сдвига — количеству тактов управления.

Структура запоминающего устройства, выполненного на МНОП-транзисторах, аналогична структуре на МДП-транзисторах. Такая элементная база памяти матрицы позволяет создать запоминающие устройства с высокой помехоустойчивостью в связи с их малой чувствительностью к изменению питающего напряжения и, что наиболее важно, твердотельные запоминающие устройства на МНОП-транзисторах обеспечивают долговременное хранение информации при отключении питания.

## 5. ЛОГИКО-ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТИРУЮЩИМИ И ОРИЕНТИРУЮЩИМИ ДВИЖЕНИЯМИ ПР

Исследование современных технологических процессов и оборудования, тенденций и перспектив их развития показывает, что в ближайшие 10...15 лет основным используемым в промышленности типом ПР будут роботы с дискретным управлением, работающие по жестким циклам управления с незначительными элементами адаптации. Повышение эффективности внедрения роботов невозможно без значительного улучшения их технических характеристик и увеличения показателя функциональной универсальности, что достигается использованием более совершенных, в частности, цифровых исполнительных приводов, модульного принципа построения и созданием относительно несложных, надежных и эффективных систем управления, которые легко стыкуются с системами управления современного технологического оборудования и допускают быстрое перепрограммирование [44].

Проведенный анализ показал, что в ПР, предназначенных для выполнения транспортных, загрузочно-разгрузочных и отдельных видов сборочных операций, наиболее эффективно логико-программное управление, под которым понимается управление движениями рабочих органов манипуляционной системы ПР в соответствии с системой логических уравнений управляющих команд. Существует общность робототехнических задач с задачами большинства автоматизируемых операций, характеристикой которых является перемещение объекта (или инструмента) в пространстве от одной позиции к другой по заданной траектории (в том числе через определенные фиксированные позиции) с одновременной переориентацией объекта (инструмента).

Мероприятия по разработке логико-программного управления транспортирующими и ориентирующими движениями рабочих органов ПР разбиваются на ряд этапов [45]:

анализ конструкции, режимов и условий эксплуатации промышленных роботов с дискретным управлением, а также траекторий перемещения объектов и инструмента, типичных для роботизируемой технологической операции, с целью определения способов задания траекторий перемещений и ориентации рабочих органов и алгоритмов получения последовательности действий исполнительных приводов ПР, включаемых в технологический процесс;

наложение ограничений на полученную последовательность действий исполнительных приводов, вытекающих из допущений о виде и характере заданной траектории перемещения (траектория представляет собой кусочно-непрерывную кривую, каждый из участков которой соответствует перемещению только по одной координате);

составление последовательности действий исполнительных приводов ПР с учетом указанных ограничений;

построение функциональной модели и разработка алгоритма функционирования системы логико-программного управления с учетом возможных сбоев и их последствий на выполнение последовательности действий исполнительных приводов ПР;

получение последовательности управляющих команд — дискретных сигналов, вызывающих срабатывание исполнительного привода; исследование исходной последовательности управляющих команд на возможность безотказного управления. В случае неподтверждения безотказного управления — преобразование и дополнение исходной последовательности управляющих команд без нарушения последовательности действий исполнительных приводов ПР;

разработка системы логических уравнений последовательности управляющих команд с учетом того, что любая команда может быть представлена в виде логически взаимосвязанного множества сигналов о положении рабочих органов ПР и о работе технологического оборудования. Логические уравнения входящих в последовательность управляющих команд образуют систему логических уравнений, обеспечивающих строгое выполнение заданной последовательности действий исполнительных приводов ПР;

разработка общего алгоритма логико-программного управления транспортирующими и ориентирующими движениями ПР с учетом ограничений, обусловленных дискретным характером управления и специфическими особенностями эксплуатации ПР;

разработка комплекса программ для ЭВМ, реализующего общий алгоритм логико-программного управления и обеспечивающего проведение анализа массива данных, составление последовательности действий исполнительных приводов ПР, получение последовательности и формирование системы логических уравнений управляющих команд.

При разработке логико-программного управления ПР учитывают массив исходных данных, который содержит информацию о заданной траектории перемещения и требуемой ориентации рабочего органа (инструмента), а также вспомогательную информацию, отражающую специфические особенности построения манипуляционной системы ПР. Наличие комплекса программ упрощает процесс программирования управления, ограничивая его заданием требуемой траектории перемещения и ориентации рабочего органа ПР и обеспечивая возможность быстрого перепрограммирования.

Система логических уравнений может быть реализована как в виде системы дискретного управления — блоков с однородными логическими элементами и элементами памяти, соединенных штеккерной панелью, на которую выводятся сигналы датчиков и технологического оборудования, так и в виде программы для мини-ЭВМ. В случае системы дискретного управления процесс программирования движений рабочих органов ПР осуществляется набором на штеккерной панели системы логических уравнений управляющих команд, и, таким образом, не представляет трудностей для оператора. Такая система управления надежна, проста в обслуживании и легко перепрограммируема. В случае использования мини-ЭВМ система логических уравнений управляющих команд записывается в виде программы в соответствующем машинном коде.

Более подробно процедура синтеза систем логико-программного управления ПР и робототехнологическими комплексами (РТК) рас-

смотрена в работе [34]. Здесь же ограничимся изложением основных положений логико-программного управления ПР\*.

Применительно к ПР «элементарная циклическая» операция представляет собой строго заданную последовательность определенных дискретных действий. Ход этих действий характеризуется множеством сигналов  $P$ , совокупность которых и свидетельствует о выполнении операции в целом. На каждом фиксированном отрезке времени  $\tau$  может быть определен вектор сигналов  $\bar{C}$ , которым описываются ранее выполненные ПР действия, и, следовательно, характеризуются положение и ориентация рабочего органа манипулирующей системы робота:

$$\bar{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \in P.$$

Дальнейшее изменение состояния ПР определяется одной координатой  $C_k$  и, следовательно, преобразованием векторов  $\bar{C} \rightarrow \bar{C}'$ , а полная последовательность действий — появлением последовательного ряда векторов  $\bar{C}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ).

Совокупность действий ПР является следствием выполнения программы системы управления, представляющей собой последовательность управляющих команд, т. е. может быть установлено соответствие между последовательностью дискретных действий ПР и последовательностью управляющих команд  $B: B_k \rightarrow \bar{C}_k$ .

Дискретный характер управления предопределяет последовательность следования команд и исполнительных действий, а именно, переход к каждой последующей управляющей  $B_{k+1}$ -й команде осуществляется только после выполнения предыдущей  $B_k$ -й команды, т. е. при появлении вектора сигналов  $\bar{C}_k: B_{k+1} = F|\bar{C}_k|$ , где  $F$  — логическая функция.

В общем случае управляющую команду, определяемую состоянием системы управления в момент ее формирования, можно представить как функцию ряда

$$B_k = Z(\bar{C}_{k-1}, \bar{C}_{k-2}, \dots, \bar{C}_1),$$

где  $Z$  — обобщенная логическая функция. Теоретически такая запись показывает, что условие формирования команды определяется всем подмножеством сигналов  $P_k \in P$ , поступивших в систему от исполнительных приводов к моменту времени  $\tau_k$ . В реальных условиях можно получить более узкое подмножество сигналов  $P_k^*(P_k^*, P_k)$ , что обуславливается выбором функции, элементной базой системы управления и требованиями обеспечения надежности процесса управления. Возможность появления тождественных векторов

$$\bar{C}_l = \{C_1, C_2, \dots, C_l\} = \bar{C}_m = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}$$

либо тождественного включения одного вектора в другой

$$\bar{C}_l = \{C_1, C_2, \dots, C_l\} \in C_q = \{C_1, C_2, \dots, C_l, \dots, C_n\}$$

\* Основные положения логико-программного управления ПР разработаны инж. Л. Ю. Николаенко.

приводит к формированию управляющей команды (или нескольких команд одновременно), нарушающей заданную последовательность команд, а также к появлению ложных сигналов за счет различия в быстрой реакции срабатывания элементов системы управления и приводов робота, отказов в работе системы управления и т. п. Поэтому цель программного управления ПР можно сформулировать следующим образом: обеспечить точное выполнение заданной последовательности действий, устанавливая функциональную зависимость между управляющей командой  $B$  и множеством сигналов  $P_k^*$  за счет необходимого и достаточного числа элементов подмножества  $P_k^*$ . Для этого строится функциональная модель системы управления, которая явля-

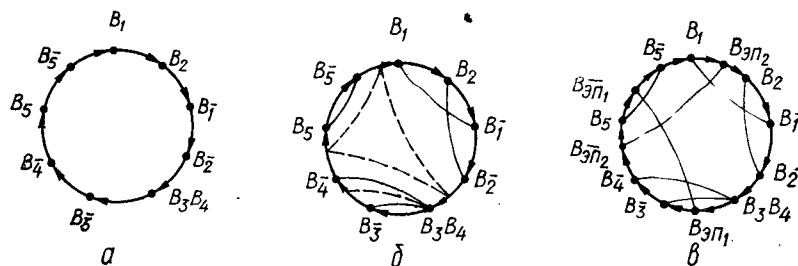


Рис. 7.4. Функциональные графы управления:  
а — циклический исходный; б — подграф связи; в — реального процесса управления

ется логико-математическим описанием ее работы и позволяет рассматривать заданную последовательность действий и процесс управления ими как единое целое. В качестве аппарата морфологического описания функциональной модели наиболее предпочтительно использовать ориентированный функциональный граф. Графическое представление функциональной модели дает возможность использовать единый аппарат формализованного описания как задач управления, так и объектов роботизации — процессов, деталей, сборочных соединений и структур РТК.

Состояния системы управления и формируемые в этих состояниях управляющие команды можно представить циклическим функциональным графом (рис. 7.4, а). Дуги графа соответствуют множеству мгновенных состояний системы, причем логически обратные команды обозначены  $B_i$ , в отличие от управляющих команд  $B_i$ .

Построение модели начинается с подграфа связи, представляющего собой совокупность проведенных в функциональном графе и связывающих вершины вида  $B_i$  —  $B_j$  (рис. 7.4, б) линий. Каждое ребро подграфа (линия связи) выделяет область существования управляющих команд  $B_i$  и  $B_j$ , а следовательно, и соответствующих им векторов  $\bar{C}_i$  и  $\bar{C}_j$ . Подграф связи является естественным дополнением любого функционального графа.

Наличие тождественных векторов сигналов системы управления выявляется после построения неориентированного подграфа неопре-

деленности — совокупности проведенных в функциональном графе линий, не пересекающих ни одного ребра подграфа связи. В случае наличия точек пересечения ребер подграфа неопределенности с дугами функционального графа система управления имеет тождественные векторы сигналов; невозможность построения подграфа неопределенности свидетельствует об отсутствии состояний системы управления с тождественными векторами сигналов.

Задачей синтеза системы, обеспечивающей безотказное управление, является устранение тождества векторов сигналов в найденных состояниях преобразованием этих векторов за счет дополнительных сигналов, вводимых в систему элементов памяти:

$$\bar{C}_i = \{C_1, C_2, \dots, C_i\} \rightarrow \bar{C}'_i = \{C_1, C_2, \dots, C_i, C_{i+1}\}.$$

Состояния срабатывания элементов памяти определяются построениями на функциональном графе, выполняемыми с учетом следующих требований: 1) дополняющие подграф связи линии связи элементов памяти должны пересекать все ребра подграфа неопределенности; 2) каждая линия связи элементов памяти должна образовывать максимально возможное число пересечений с теми ребрами подграфа неопределенности, которые не были пересечены предыдущими линиями связи. Первое требование устраняет состояния системы управления с тождественными векторами сигналов, а второе — обеспечивает минимальное и достаточное количество элементов памяти.

Таким образом, реальный процесс управления описывается преобразованием функциональным графом (рис. 7.4, в).

Функциональная зависимость между управляющими командами и соответствующими подмножествами сигналов устанавливается с помощью логических уравнений управляющих команд, представляющих ряд сигналов (подмножество  $P_k^*$ ), связанных соотношениями математической логики. В свою очередь необходимое и достаточное число элементов подмножества  $P_k^*$  определяется областью существования управляющей команды, которая может представлять собой в общем случае ломаную линию из отрезков пересекающихся линий связи с началом в вершине (обозначении) управляющей команды  $B_i$ . Замыкающая вершина определяется системой логических уравнений. Число изломов линии, ограничивающей область существования управляющей команды, определяет необходимое и достаточное число сигналов, а общая система логических уравнений управляющих команд полностью определяет процесс управления и его характеристики.

## 6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В устройствах ПР применяются электромеханические, электронные, пневматические и гидравлические элементы от простейших и до самых сложных (например, интегральные микросхемы различной степени интеграции).

В большинстве эксплуатируемых в настоящее время управляющих устройств ПР функции управления реализуются аппаратным путем, т. е. алгоритм функционирования устройства является жестким.

Новым этапом в проектировании управляющих устройств ПР с повышенным набором функциональных возможностей является применение больших интегральных схем микропроцессоров и различного типа запоминающих устройств. В этом случае необходимые функции управляющего устройства обеспечиваются программным путем. Примером микрокомпьютерного набора является набор, выпускаемый фирмой «ИНТЕЛ» (США). Он содержит восьмиразрядный параллельный центральный процессор; оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) емкостью 1024 восьмиразрядных слов; ПЗУ емкостью 768 восьмиразрядных слов; интерфейс телетайпа.

Модули центрального процессора и памяти построены на основе МОП-транзисторов. Особенностью микропроцессора в данном случае является то, что в качестве памяти может быть использована любая комбинация из нескольких типов ОЗУ, ПЗУ и сдвиговых регистров, причем тип памяти определяется характером конкретного применения. ОЗУ применяется в тех случаях, когда необходима частая смена программ; ПЗУ служит в качестве более долговременного хранилища программ; сдвиговые регистры используются для последовательной обработки информации.

Применение больших интегральных схем, таких, как микропроцессоры, ОЗУ, ПЗУ и другие, значительно расширяет функциональные возможности управляющих устройств ПР. Кроме того, число элементов в электронных схемах устройств значительно уменьшается, и снижается стоимость при повышении качества управления. Уменьшение числа элементов приводит к более легкому обслуживанию и повышению надежности, а также к значительному уменьшению размеров устройства.

В табл. 7.2 приведен перечень основных электронных элементов, применяемых в управляющих устройствах ПР, а в табл. 7.3 — перечень элементов, требующихся для перспективных управляющих устройств.

7.2 Перечень основных электронных элементов, применяемых в управляющих устройствах ПР

Наименование	Серия	Назначение
Микросхемы; ТТЛ	K155	Реализация логических функций цифровых устройств
ТТЛ	K511	Высокоуровневые помехоустойчивые логические схемы
Аналоговые ключи на МОП-транзисторах	K190	Коммутация аналоговых сигналов
Операционные усилители ПЗУ с электрической сменой информации	K153 K558	Аналоговые схемы Перепрограммируемая постоянная память рабочих программ
Электрорадиоэлементы	—	Выходные усилители, блоки питания

7.3. Перечень электронных элементов для перспективных управляющих устройств ПР

Наименование	Тип, серия	Назначение	Характеристика
Микро-ЭВМ	Электроника-60; НЦ-03; НЦ-04	Логические и арифметические операции	Быстродействие не менее 250 тыс. операций/с, 16 разрядов
Микропроцессоры	K589; K580; K584 ИК1		
Большие интегральные схемы ОЗУ	K565 РУ1 K155 РУ5 K527 РУ3 K564 РУ2	Оперативная память	Емкость 4 Кбит, быстродействие 400 и 600 нс Емкость 256 бит, быстродействие 45 нс Емкость 1 Кбит, быстродействие 400 нс Емкость 256 бит, быстродействие 500 нс
Большие интегральные схемы полупостоянных ЗУ	—	Полупостоянная память	Емкость 2—4 Кбит, с электрической сменой информации, время хранения 1000 ч
Магистральные элементы	K559 ЛП1, K559 ЛП2	Быстродействующие магистральные усилители	—
Большие интегральные схемы цифроаналоговых преобразователей	—	Преобразование информации	8—12 разрядов
Интегральные схемы вторичных источников питания	—	Стабилизаторы напряжения	Напряжение 5 и 24В; ток 1 и 5А

Аналогичным образом должны совершенствоваться системы управления, основанные на пневматических и струйных элементах автоматике. Одна из задач — миниатюризация элементов струйной техники — пневмоники, а также совмещение нескольких функций в одном элементе.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РТК

1. ЭЛЕМЕНТЫ И СРЕДСТВА ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО  
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Целью информационного обеспечения является придание роботу свойств, позволяющих ему функционировать в изменяющихся условиях. При этом учитываются изменения как в окружающей среде, происходящие с объектами воздействия, так и внутреннего состояния ПР (условия его нагружения, значения кинематических и динамических параметров). Благодаря этому робот может целенаправленно функционировать в условиях, не предусмотренных программой его действий.

Для решения такой задачи необходимо использовать различные датчики, средства анализа обстановки, окружающей ПР, а также средства анализа положения и состояния элементов как самого робота, так и обслуживаемых им технологических машин. В первом случае средства информационного обеспечения относятся к внешним, а во втором — к внутренним.

Одними из основных средств информационного обеспечения являются чувствительные органы ПР, которые могут быть контактными и бесконтактными. Первые позволяют фиксировать контакт ЗУ с деталью, ее зажим или проскальзывание, измерять усилия при захвате, физические или химические свойства среды. Средства обеспечения ПР информацией о внешней среде являются бесконтактными (телекамеры, дальномеры, измерители скорости, голографические средства и т. п.). Особенность последних при оснащении ими захватных устройств-ПР состоит в том, что они, с одной стороны, представляют элементы зрения (видения), а с другой, — элементы осязания. Например, пневматический струйный датчик можно отнести к органам осязания, осуществляемого без непосредственного контакта, а также к органам зрения.

Средства внутреннего информационного обеспечения ПР. Выбор средств внутренней информации определяется условиями работы, например, частотой включения, а также их габаритами. Контактные конечные выключатели используются для ограничения рабочих перемещений по отдельным координатам, а также для контроля зажима и разжима захватов и их кантования. Бесконтактные путевые выключатели применяются там, где частота их включения достаточно высокая.

В позиционных устройствах программного управления, применяемых в ПР, отличительной особенностью является наличие режима обучения. В этом режиме перемещения ЗУ в требуемую точку пространства записываются в память устройства управления с помощью датчиков обратной связи подвижных звеньев.

Датчики обратной связи подвижных звеньев манипулятора могут быть аналоговые или цифровые. В качестве аналоговых датчиков

наиболее распространены потенциометры, вращающиеся трансформаторы и электромагнитные преобразователи перемещений [75]. В роботах используют многооборотные проволоочные потенциометры с большой разрешающей способностью. В некоторых типах роботов применяют вращающиеся трансформаторы ВТМ-1В, ВТ-5 и др. Перспективно применение многополюсных синусно-косинусных вращающихся трансформаторов типа СКТД-6465 Д, у которых в одном корпусе совмещены машины для грубого и точного отсчетов. Такая конструкция упрощает установку вращающихся трансформаторов на механизм ПР.

Вращающиеся трансформаторы используют и в цифровых системах отсчета. В этом случае информация в аналоговой форме на выходе трансформатора преобразуется в цифровую, представляющую собой код угла поворота вала трансформатора. В настоящее время в СССР разработаны 16-оборотные датчики преобразования угла поворота в 12-разрядный двоичный код типа ПКП-1213, Д-41 и др.

В числовых устройствах позиционного управления типа УПМ, применяемых для управления ПР со значительным числом точек позиционирования, с помощью операционно-логического блока сравнивается положение рабочих органов ПР с заданным программой управления, затем выдаются управляющие команды на робот и обслуживаемое оборудование для обработки разницы. В устройстве типа УПМ-552, предназначенном для управления ПР со следящим приводом, информация о положении рабочих органов поступает в устройство с двухотсчетных фазовых датчиков обратной связи. С помощью формирователей фазы и преобразователей фаза-цифра эта информация принимает цифровой вид и передается в операционно-логический блок.

Напряжение питания датчиков обратной связи формируется блоком питания. В качестве последних используются двухотсчетные синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы типа СКТД-6465Д.

В РТК механической обработки деталей типа тел вращения, в который входит робот «Универсал-15М», два станка с численно-программным управлением, три магазина-накопителя деталей, контроль наличия деталей в магазинах и контроль зажима-разжима деталей механизмом зажима центров станка осуществлен с помощью датчиков — конечных выключателей.

Роботы с сервоуправлением имеют внутренние датчики (положения, скорости, ускорения, силы, момента), обеспечивающие контроль внутреннего состояния робота. Сравнением фактических и заданных параметров в случае необходимости вносятся соответствующие коррекции.

В целом для успешного взаимодействия робота с захватываемым объектом необходимо наличие в его внутренней информационной системе трех видов датчиков: приближения — предназначены для того, чтобы робот видел объект еще до соприкосновения с ним; динамических нагрузок — для предотвращения деформации и повреждения объекта при зажиме в руке; осязания.

Основное внимание при разработке средств внутренней информации уделяют датчикам осязания, позволяющим не только опознавать объекты, но и (что наиболее важно) обеспечивать надежный их захват

и удержание. Таким образом, исключается опасность перехвата детали или ее вылета в процессе транспортирования, что уменьшает в первом случае возможность возникновения аварийной ситуации для оборудования, а во втором — возможность травматизма для обслуживающего персонала.

К датчикам осязания относятся: датчики касания, определяющие контакт ЗУ с объектом или с каким-либо препятствием; датчики усилия зажима детали (проскальзывания), определяющие перемещение захваченной детали относительно ЗУ; тактильные датчики, определяющие геометрический образ объекта.

Датчики касания представляют собой различного рода микровыключатели, установленные на пальцах руки. Их преимущество состоит в простоте конструкции; недостатком является то, что факт контакта с предметом такой датчик определяет только в точке его размещения. Достаточно удобны и перспективны в применении пневматические датчики типа сопло-заслонка. Их основное преимущество заключается в том, что чувствительные элементы можно вывести за пределы руки манипулятора, оставив в ней только выходное сопло; недостаток — удлинение коммуникационных линий, соединяющих выходное сопло с чувствительным элементом.

Перспективными являются также электретные датчики, характеризующиеся малыми размерами ( $2,7 \times 2,9$  мм), с электретным напряжением 500 В. Электретное напряжение является результатом поляризации высоким напряжением пластинки датчика, состоящей из полимерной пленки-диэлектрика с подложкой из алюминиевой фольги. Выходной сигнал подается с электретного электрода на интегральную схему усилителя и от него — на блок управления пальцами руки. Усилие, на которое реагирует электретный датчик, равно  $0,015 \pm 0,005$  Н. Преимущество таких датчиков состоит в том, что они одновременно являются генераторами электрической энергии и не требуют отдельных источников питания.

Для нагретых деталей датчиками касания могут служить различные температурные датчики. В частности, может быть использована система термографирования с инфракрасными оптическими волокнами [62]. Оснащение пальцев ЗУ средствами волоконной оптики позволяет достаточно просто по величине затемнения отдельных волокон судить о месте контакта пальца с объектом, а по мере их освещения — и о его проскальзывании. Несомненно, что применение волоконной оптики в средствах осязания, особенно в средствах ближней локализации, перспективно.

В датчики усилия зажима детали основаны на свойстве упругих тел деформироваться пропорционально прилагаемому к ним усилию [81]. Поэтому любой датчик усилия включает в себя деформируемый упругий элемент, контактирующий с деталью, и схему преобразования величины деформации в соответствующий сигнал, характеризующий собой усилие зажима. Одним из таких упругих элементов служит электропроводная резина, ток в которой зависит от степени ее деформации. К электропроводным резиновым датчикам относится, например, вспененный полиуретан, заключенный с обеих

сторон между тонкими металлическими пластинками. Изменение давления в датчике преобразуется в изменение сопротивления между пластинами.

Датчики проскальзывания основаны на регистрации движения детали относительно ЗУ. Такие датчики выполняются контактными и бесконтактными. Первые имеют элементы, входящие в контакт с зажимаемой деталью, вторые при скольжении детали изменяют свое положение относительно некоторых базовых элементов ЗУ, что является сигналом о начале проскальзывания. В одной из распространенных конструкций бесконтактных датчиков проскальзывания последний снабжен преобразователем, который оснащен роликом малого диаметра, проворачивающимся при проскальзывании детали. Вращение ролика преобразуется в электрический сигнал с помощью фотоэлектрического кругового датчика. При проскальзывании усилие захвата увеличивается до тех пор, пока скольжение не прекратится. Для увеличения трения между деталью и роликом последний армируется резиной.

Другое устройство, определяющее проскальзывание детали и усилие зажима, отличается той особенностью, что в каждом из пальцев ЗУ свободно расположена резиновая мембрана, перекрывающая отверстие в нем. При захвате детали в полость пальцев подается сжатый воздух, давление которого регулируется. Воздух под давлением прижимает мембрану к отверстию и деформирует ее. Тем самым деталь зажимается в пальцах с помощью мембран. Усилие зажима определяется деформацией мембраны, а проскальзывание по ней детали ведет к изменению этой деформации. Измерение последней позволяет оценить комплексно условия зажима. В данном случае мембрана играет роль первичного преобразователя, измерение деформаций которого позволяет судить о характере зажима детали. Для увеличения коэффициента чувствительности такого преобразователя к мембране можно прикрепить рычажки, воздействующие на вторичные преобразователи, управляющие подачей воздуха в полости пальцев.

На рис. 8.1 показана структурная схема алгоритма регулирования силы захвата в зависимости от показаний тензометра, установленного на руке робота. После начала захвата осуществляется сжатие пальцев ЗУ на один шаг и предпринимается рукой ПР попытка приподнять деталь. При этом проверяются показания тензометра (датчика массы). Если масса не зафиксирована, сжатие на один шаг и попытка поднять деталь повторяются; если масса зафиксирована, она измеряется и формируется порог, равный 1,3 массы детали. Затем увеличивается сила сжатия и контролируется давление на деталь, которое должно соответствовать пороговой массе. Деталь при этом надежно удерживается в захвате.

Тактильные датчики просты по конструкции, малогабаритны и имеют меньшую стоимость. При этом форма тактильного образа детали может быть использована также для распознавания класса детали и ее положения в пространстве. На рис. 8.2 показан поверхностно-тактильный датчик, представляющий собой тонкую стальную пластинку 1 с несколькими миниатюрными выпуклыми по-

верхностями типа «хлопающая мембрана», которые занимают только два устойчивых положения — верхнее и нижнее.

При отсутствии контакта с деталью 2 хлопающие мембраны 1 находятся в верхнем устойчивом положении. При соприкосновении мембран с деталью они перескакивают в нижнее положение, замыкая электрические контакты 3. Такой датчик позволяет измерять нагрузку порядка

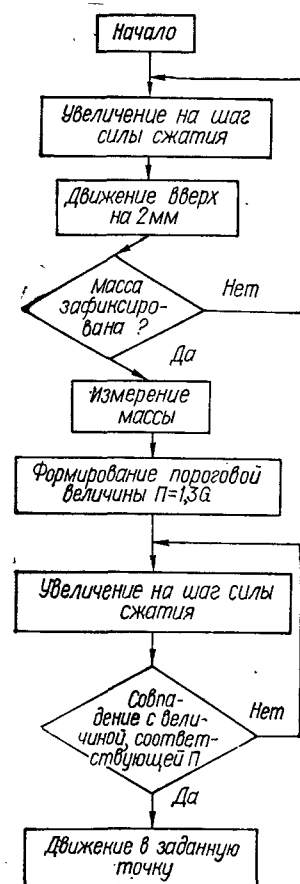


Рис. 8.1. Алгоритм регулирования усилия захвата

и получать информацию о форме поверхности и размерах детали, а также о ее положении.

Средства внешнего информационного обеспечения ПР. Среди всего комплекса информационных потоков основное значение имеет визуальная информация, которая наиболее полно передает окружающую обстановку. Средства зрительного восприятия являются главными каналами связи робота с внешним миром, по ним поступает наибольший поток информации, необходимой для его управления. Характерной

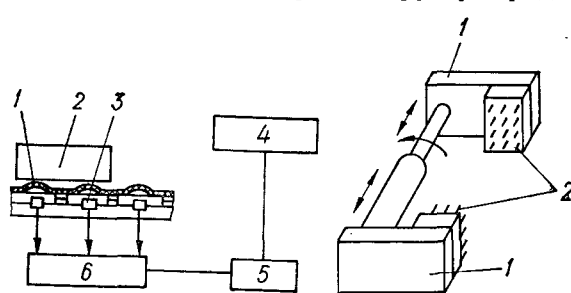


Рис. 8.2. Поверхностно-тактильный датчик

Рис. 8.3. Захват с игольчатыми датчиками

0,5 Н, приходящуюся на одну мембрану. Сигналы с контактов поступают на схему совпадения 6 и после усилителя 5 используются системой управления 4 ПР.

Рассмотрим способ ввода объемной тактильной информации в компьютер [25]. На пластинках-пальцах 1 робота (рис. 8.3) установлены игольчатые датчики 2 контактного типа в виде матрицы  $10 \times 8$ . Каждая игла может легко перемещаться в направлении, перпендикулярном плоскости пальца, при этом в свободном состоянии легкая пружина поджимает ее к упору. Захватное устройство, сжимая деталь, заставляет иглы касаться ее поверхности. Компьютер периодически опрашивает все датчики, вводя в память контурную картину. Сравнивая два последовательных опроса, можно исключить из рассмотрения контакты, которые были замкнуты на предыдущем шаге,

особенностью сигналов изображения является их широкая полоса частот.

Глубина обработки и анализа воспринимаемого изображения, т. е. способность робота понять содержание изображения, скрывающегося за его внешней формой, зависит от уровня его интеллекта. При этом в первую очередь необходимо выделить объекты из окружающего фона и описать их в машинном виде, чтобы ЭВМ могла переработать поступившую информацию и сформировать необходимые команды на манипулятор и ЗУ.

Последовательность действия зрительного анализатора робота в общем случае сводится к следующим операциям: поиск объектов фотоэлектрическим сканированием пространства, а также изменением ориентации видеодатчика; измерение дальности до объектов одним из стереоскопических методов или по данным автоматической фокусировки; подстройка чувствительного видеодатчика в соответствии с освещенностью участка изображения; выделение контуров изображений объектов и их анализ; опознавание объектов. Все эти операции выполняются с помощью различных функциональных блоков, связанных с ЭВМ в единую систему. Причем, в качестве средств зрительного восприятия используются телевизионные датчики, голографические видеоанализаторы, приборы с зарядной связью (ПЗС-структуры), диссекторы.

Типичная схема зрительного восприятия робота заключается в следующем. Первичная информация об объемной сцене снимается с помощью зрительного датчика и фиксируется в виде матрицы двумерного распределения яркостей в плоскости проекции. Эта информация обрабатывается набором аппаратных и программных средств, выделяющих первичные характерные признаки в изображении: линии, их пересечения, область однородности и т. п. Такая совокупность признаков перерабатывается другим набором процедур для получения информации более высокого уровня: контуров, связей между ними, совокупностей контуров, предположительно относящихся к конкретному объекту, и т. д. Новый ряд программ позволяет идентифицировать отдельные объекты, определять их ориентацию, положение в пространстве, а также пространственное отношение между ними.

В системах зрительного восприятия, как правило, имеется возможность управления рядом параметров телевизионного датчика, в том числе фокусировкой, раскрытием диафрагмы, чувствительностью и др. Параметры телевизионного датчика изменяются по результатам обработки зрительной информации.

Сигналы с выходов телекамер квантуются с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя и поступают на вход запоминающего устройства ЦВМ. Поскольку программные средства системы оперируют с двумерными изображениями, возникает задача создания таких условий освещенности объектов, при которых нужные участки изображения представляются в виде высококонтрастных участков. При этом используются три способа повышения контрастности: применение контрастирующего фона, светофильтров и специального освещения.

Прежде всего определяется рабочая зона. При распознавании объектов на основании различий в освещенности элементов их поверхности определяются контуры предметов, наклон линий объекта, их количество и длина. Исходя из этих сведений, объекты классифицируются по форме. Далее при составлении описания внешней среды роботом определяется пространственное расположение выделенных объектов. Расстояние до отдельных точек окружающей среды можно определять, например, с помощью системы стереозрения, в которой расстояния измеряются фотограмметрической обработкой стереопар плоских изображений сцены. При этом обеспечивается совмещение процедуры пространственного восприятия и распознавания.

Одна из систем стереозрения [15, 29] содержит два одинаковых оптических канала, которые формируют стереопару плоских изображений, и оптико-электрический преобразователь. Преобразователь выполняет дискретизацию и квантование оптических изображений, необходимые для последующей цифровой обработки в сенсорной системе робота.

С помощью полученной информации о координатах видимых точек изображения могут быть вычислены их пространственные координаты. Для измерения расстояния используется освещение известным образом ориентированной в пространстве светящейся плоскости объекта. Развернутый в вертикальной или горизонтальной плоскости лазерный луч проектируется на исследуемый объект и образует на нем узкие линии пересечения. Эти линии с помощью оптики проектируются на фоточувствительную поверхность одной или двух передающих трубок, расположенных рядом. При этом формируется группа линий пересечения для различных углов проекции лазерного луча. Обработка видеосигналов о наклоне, длине, точках излома и изгибе этих линий позволяет получить описание объекта, определить его форму и пространственную ориентацию.

В последнее время все большее внимание уделяется обработке визуальной информации на базе голографии. Это направление характеризуется комплексным применением радиофизических и электродинамических принципов, а также микроволновой и интегральной оптики. Перспективными голографическими видеоанализаторами являются устройства, основанные на использовании микроволноводов. При этом новые технологические и схемные решения позволяют повысить экономичность и помехозащищенность волоконно- и интегрально-оптических устройств.

В качестве зрительных органов роботов используются также твердотельные преобразователи изображения с самосканированием. Твердотельные преобразователи относятся к полупроводниковым анализаторам, среди которых выделяются приборы с зарядной связью (ПЗС-структуры). В настоящее время имеется возможность создания целого ряда разнообразных интегральных датчиков изображения на ПЗС-структурах с различным пространственным разрешением.

Преобразователь с зарядной связью состоит из вертикальной решетки 1 регистров ПЗС, которые освещаются через прозрачные за-

творы с лицевой стороны или через тонкую подложку с обратной стороны (рис. 8.4). Потенциальный рельеф образуется под обратносмещенными МОП-конденсаторами преобразователя в течение времени передачи поля. Затем все регистры запускаются в течение времени обратного хода кадровой развертки, и потенциальный рельеф переносится неповрежденным из области преобразователя в область временного накопления 2. В следующем поле развертки накопленные заряды продолжают продвигаться параллельно по направлению к верхней части решетки, где каждый ряд переключается последовательно на

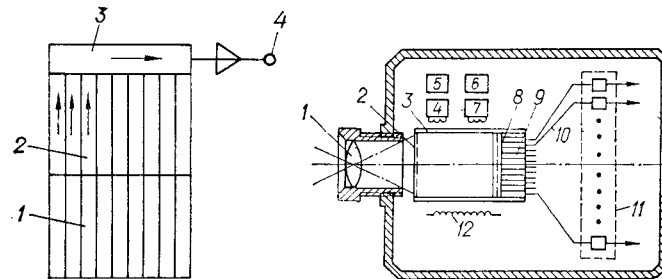


Рис. 8.4. Поверхностный преобразователь с зарядной связью анализатора изображения

Рис. 8.5. Структурная схема многофункционального обзорного устройства

соответствующую строку с помощью выходного регистра 3 с зарядной связью и поступает на считыватель 4.

В некоторых схемах в качестве сенсорного анализатора изображения используется д и с с е к т о р, выходной торец которого выполнен в виде стеклянной планшайбы, покрытой люминофором, с размещенным в ней большим числом тонких световодов, служащих для съема видеосигналов. Основным блоком этого устройства (рис. 8.5) является сканирующий электронно-оптический преобразователь с световолокнистой планшайбой 9, выводы 10 которой упорядоченно соединены с матрицей 11 светочувствительных элементов. Различные элементы этой матрицы в разных топологических комбинациях включаются с помощью самонастраивающихся решающих блоков. При этом происходит переключение рецептивных полей матрицы светочувствительных элементов с изменением их размера, положения и топологической ориентации их входных цепей.

Устройство содержит объектив 1, проектирующий на фотокатод 2 электронно-оптического преобразователя 3 оптическое изображение объекта. Магнитное поле, создаваемое катушкой 12, фокусирует электронное изображение на слой люминофора 8, нанесенного с внутренней стороны волоконной планшайбы 9. Генераторы 4 и 7 ступенчатых адресных токов отклонения по осям X и Y обеспечивают перемещение электронного изображения относительно планшайбы. Группа выводов 10 переводит световой поток на матрицу 11 с сохранением упорядочен-

ности. Кроме того, устройство содержит преобразователи код — аналог 5 и 6 для координат  $X$  и  $Y$  соответственно, а также устройство изменения фокусировки.

Структурная схема анализатора видеозображения (рис. 8.6) содержит три группы блоков: коммутаторы входных цепей сетчатки и рецептивных полей, блоки управления порядком выполняемых операций и счетно-решающие блоки. К первой группе блоков относятся коммутаторы  $KC$ ,  $K1$ , ...,  $K_i$  и переключатель  $B$ ; ко второй — специ-

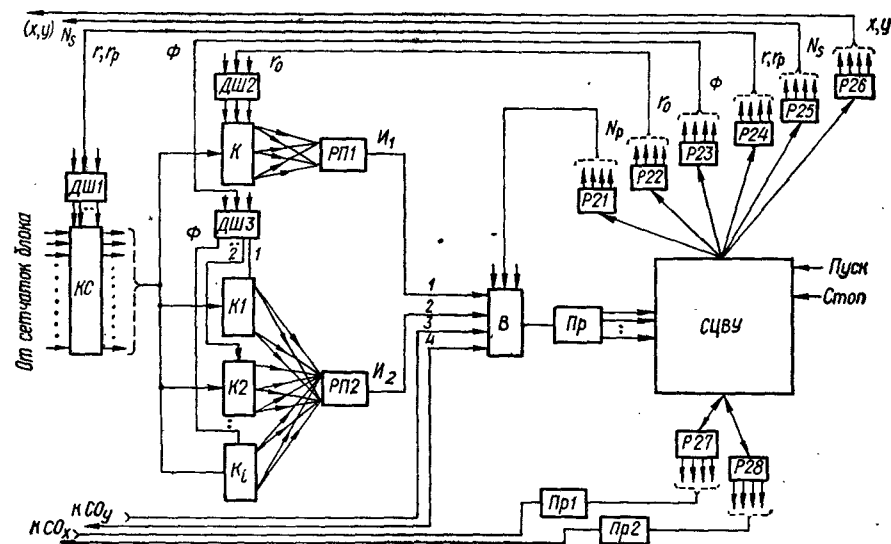


Рис. 8.6. Структурная схема анализатора видеозображения

ализированное цифровое вычислительное устройство  $СЦВУ$  и сопряженные с ним регистры  $P21...P28$ , дешифраторы  $ДШ1—ДШ3$ , преобразователь аналог—код  $Пр$  и преобразователи код—аналог  $Пр1$  и  $Пр2$ . К третьей группе относятся блоки рецептивных полей  $РП1$  и  $РП2$ , образующие в совокупности с подключаемой к ним планшайбой 9 (см. рис. 8.5) модели рецептивных полей.

Специализированное цифровое вычислительное устройство рассчитано на работу при последовательной стратегии. Решение любой задачи начинается с последовательного выполнения следующих операций: поиск точки, находящейся вблизи границы контрастности; выделение граничного элемента; локальный анализ окрестностей граничного элемента и опознавание локального элемента изображения; выделение контурного элемента, локального граничного участка и др. В результате выполнения этих операций осуществляются различные функциональные преобразования изображений, например, выделения контурных линий детали.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Среди отработанных конструкций роботов с развитым информационным обеспечением следует отметить роботы ХИ-Т-ХЭНД типа Эксперт-2 и Эксперт-4 (фирма Хитачи, Япония) [83] и робот фирмы Оливетти (Италия). Их общая особенность и отличительные свойства состоят в том, что средства осязания смонтированы в кисти рук и реагируют на изменения вектора контактного усилия сопрягаемых деталей для каждого конкретного случая сборки.

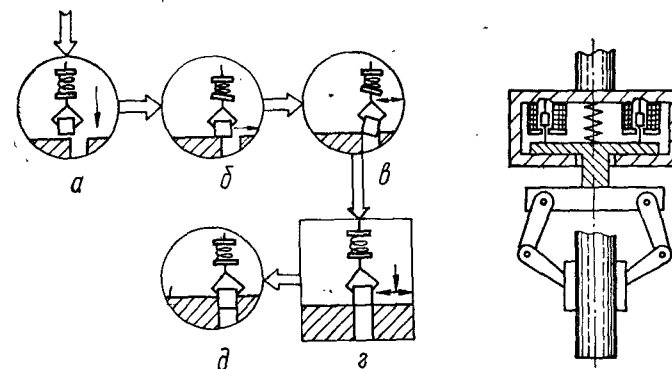


Рис. 8.7. Последовательность этапов работы робота «Эксперт-4»

Рис. 8.8. Модификация ЗУ робота «Эксперт-4»

В работе Эксперт-4 весь процесс сборки деталей разделяется на такие этапы: подвод вала, зажатого в ЗУ, к сопрягаемой детали (рис. 8.7,а); введение их в контакт, сопровождающийся деформацией упругих пружинных элементов с проволочными тензодатчиками; выработка соответствующих сигналов тензодатчиков и включение в работу приводов перемещений ЗУ (рис. 8.7,б); движение ЗУ в требуемом направлении и попадание вала в отверстие сопрягаемой детали (рис. 8.7,в); начало перемещения вала вниз (рис. 8.7,г); установка вала в отверстие сопрягаемой детали на заданную глубину (рис. 8.7,д).

На рис. 8.8 показана модификация подобного захвата, в котором вместо упругих чувствительных элементов с тензодатчиками применены индуктивные датчики в таком же количестве. Любой перекос вала, вызванный неточным его расположением относительно отверстия, фиксируется одним из четырех индуктивных датчиков, вырабатывающим сигнал на устранение этой ошибки. При дифференциальной схеме включения сигналы снимаются одновременно с двух противоположно размещенных датчиков. На аналогичном принципе работают также роботы фирмы Оливетти.

Особенностью этих роботов, обеспечивающей надежную их работу, является то, что система осязания включается и начинает работать только с того момента, когда элементы, подлежащие технологиче-

скому воздействию (сборке), входят в контакт друг с другом. До того момента, пока они (детали) не вошли в контакт, датчики не работают, и система управления никак не реагирует на смещение собираемых деталей.

Среди датчиков, реагирующих на угловые отклонения, наиболее удобны те, которые смонтированы в одном каркасе (корпусе) и представляют собой один орган (элемент). К таким датчикам относятся, например, электролитические преобразователи [20]. Действие их основывается на изменении электропроводности раствора электролита в зависимости от расстояния между электродами. Герметическая ка-

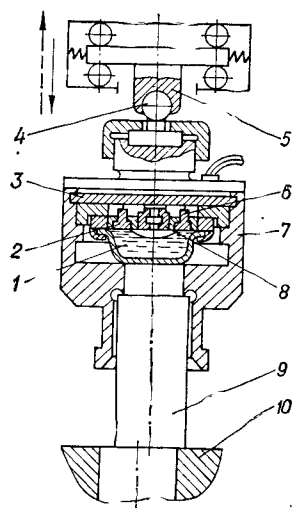
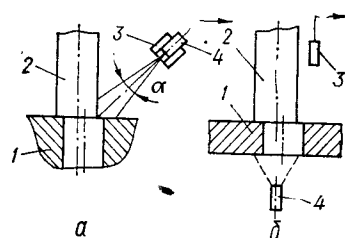


Рис. 8.9. Электролитический преобразователь взаимного расположения деталей

Рис. 8.10. Схемы взаимного расположения деталей:  
а, б — с односторонним и разносторонним расположением источника энергии и приемника



мера такого преобразователя заполняется электролитом 1 (рис. 8.9) настолько, чтобы в ней остался воздушный пузырек. В верхней части камеры имеются четыре боковых электрода, изолированных от металлического корпуса 8. Когда камера располагается горизонтально, пузырек находится посередине, и электрическая цепь между боковыми электродами и корпусом разомкнута. При наклоне камеры вправо пузырек перемещается влево и электрическая цепь замыкается между корпусом 8 и боковым электродом 6. При наклоне камеры влево электрическая цепь замыкается между корпусом и электродом 2. В преобразователе имеются четыре таких электрода, расположенных накрест. Корпус преобразователя установлен в ЗУ 7 и поджимается крышкой 3, которая через шаровую пядь 4 соединена подвижно со стержнем 5, имеющим возможность перемещаться в вертикальном направлении.

Когда ЗУ 7 опускается вниз, его нижняя часть надевается на вал 9. Последний, прижимаясь к торцу сопрягаемой детали 10, перекашивается, а вместе с ним перекашивается и захватное устройство с преобразователем, который выдает сигнал о смещении деталей. В общем случае, если перекося происходит не в плоскости чертежа, замыкаются два электрода, включающие два привода, устраняющие возникшее смещение.

Следует иметь в виду, что электролитический преобразователь питается только от источника переменного тока частотой порядка 1000 Гц, так как на низких частотах происходит электролиз электролита. Стержень 5, несущий ЗУ, должен обладать некоторой подвижностью в пределах 1—2 мм в горизонтальной плоскости, чтобы обеспечивалась возможность устранения перекося деталей 9 и 10 перед их сопряжением. Поэтому стержень укреплен на платформе, расположенной в обойме с шариками, а сама платформа центрируется по бокам пружинами.

Рассмотрим более универсальный метод сопряжения деталей (рис. 8.10). Как было отмечено, в общем случае на рабочей поверхности стола сопрягаемые поверхности вала 2 и детали 1 с отверстием смещены одна относительно другой (рис. 8.10, а). Когда вал своим нижним торцом входит в контакт с деталью, зона их стыка начинает облучаться источником 4 электромагнитной (например, лазером) или ультразвуковой энергии. При этом часть отраженной энергии улавливается приемником 3, который вместе с источником вращается непрерывно и равномерно вокруг оси вала.

Приемник дополнительно сканирует в вертикальной плоскости зону стыка (на угол  $\alpha$ ). Следовательно, результирующее движение луча источника представляет собой розеточ-

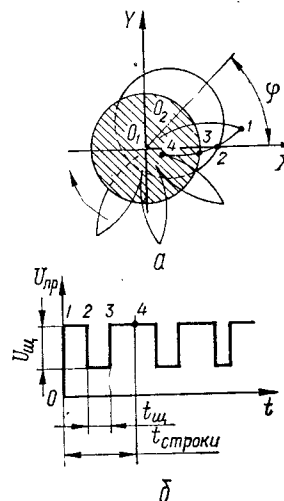


Рис. 8.11. Схема определения смещения деталей:  
а — развертка луча источника энергии; б — выходной сигнал приемника энергии

ную траекторию (рис. 8.11, а). Участки этой траектории внутри контура вала условны, так как они располагаются фактически на его боковой поверхности.

Видоизменение сопряжения показано на рис. 8.10, б. Здесь источник 4 помещен под деталь 1, а приемник 3 улавливает часть энергии, прошедшей сквозь зазор в стыке деталей 1 и 2.

В обоих случаях количество зарегистрированной приемником энергии зависит от величины зазора, т. е. от относительного смещения осей вала и отверстия. Сигналы приемника передаются на ЭВМ, которая управляет приводами, устраняющими это смещение.

В процессе сканирования луч источника скользит по поверхности детали 2, попадает в щель, затем перемещается по поверхности вала и обратно (рис. 8.10). На рис. 8.11, а часть развертки луча обозначена через 1—2—3—4. Здесь участок 1—2 представляет перемещение луча по детали 2, участок 2—3 — движение над щелью, участок 3—4 — по поверхности вала. В зависимости от направления (от угла  $\varphi$ ) и величины  $O_1O_2$  смещения осей деталей выходной сигнал  $U_{пр}$  приемника изменяет фазу и значение. На рис. 8.11, б изображен график изменения выходного сигнала  $U_{пр}$  в зависимости от времени  $t$ . На

участке 2—3 сигнал  $U_{пр}$  уменьшается на величину  $U_{пр}$ , поскольку луч «проваливается» в щель. Длительность  $t_{щ}$  импульса определяется размерами щели на этом участке (рис. 8.11, а). Продолжительности импульсов пропорциональны длинам частоты строк (траекторий), пересекающих щель.

Сигналы  $U_{пр}$  приемника поступают в ЭВМ, которая по амплитудам импульсов  $U_{пр}$  и их длительности  $t_{щ}$  определяет величину  $O_1O_2$  и направление (угол  $\varphi$ ) смещения, выдавая команды на приводы ЗУ, выводящие вал на цель (отверстие).

Результаты воздействия приводов на перемещения ЗУ проверяют на каждом очередном обороте приемника, а ЭВМ вырабатывает соответствующие корректирующие команды, выполняя тем самым роль обратной связи между деталями и приводами.

Представленный метод является более универсальным, чем метод, заложенный в основу робота «Эксперт-4», так как он обеспечивает возможность совмещения в плане любых контуров (круглых, прямоугольных, треугольных и более сложных фигур), а не только круглых.

Сборочный процесс наиболее трудно поддается автоматизации как обычными средствами, так и с помощью ПР. Поэтому сборочные работы требуют наиболее развитого информационного обеспечения. Например, сборочная машина предназначена для введения четырех щеток 1 (рис. 8.12) с гибкими электрическими проводами в щеткодержатель 2 двигателя постоянного тока. Щетки должны быть вставлены в щеткодержатель в направлении, указанном стрелками. Гибкий токопроводящий провод щетки затрудняет автоматическую подачу деталей на позицию сборки.

Сборочная машина (рис. 8.13) управляется малой вычислительной машиной (ВМ) 6 (типа PDP-8/1 с памятью емкостью  $8 \cdot 10^3$  слов). ВМ связана со всеми компонентами системы, в которые входят манипулятор 7, имеющий шесть степеней свободы ( $z, \theta, R, \gamma, \varphi, \psi$ ), не считая степеней свободы ЗУ 2, а также установленную на руке 9 телевизионную камеру 3 в качестве визуального органа восприятия. Все движения манипулятора управляются независимо электрическими шаговыми двигателями, а ЗУ — пневматическим приводом.

Расположенная на руке телевизионная камера 3 спроектирована таким образом, чтобы она могла видеть щетку даже тогда, когда последняя находится в ЗУ. Вторая телевизионная камера 1 расположена вдоль оси стержня 8, представляющего собой своеобразный магазин для собираемых щеток, на который они надеваются вручную оператором. В машине имеются два стержня для щеток, расположенных один над другим. Рядом со стержнями 8 находится управляемый ВМ рычаг 10, смещающий щетки поштучно на конец стержня 8.

Манипулятор оснащен сборочным базирующим приспособлением 4, включающим кондуктор для фиксации щеткодержателя, четырьмя парами направляющих и четырьмя толкателями для щеток. Рядом со сборочным приспособлением находятся магазины 5 для щеткодержателей. Один из них используется для хранения щеткодержателей перед сборкой, второй — для хранения собранных узлов. В каждом магазине щеткодержатели сложены стопой, причем верхний щеткодержатель

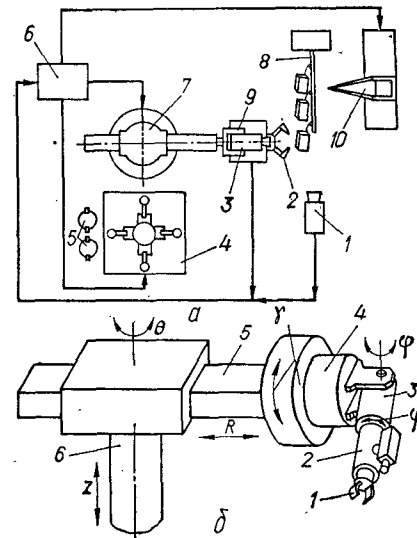
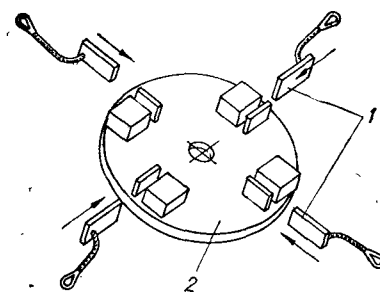
расположен на одной и той же высоте, для чего используется специальный механизм подъема. Щетки свешиваются со стержней 8, как показано на рис. 8.13, а. Телекамеры, одна из которых расположена на руке манипулятора, а другая — перед стержнем, используются для определения положения и направления щетки. Щетки перемещаются одна за другой с помощью рычага 10 к концу стержня 8, где телекамеры могут видеть щетку. В каждом стержне 15 щеток.

Основное назначение сборочной машины — введение угольных щеток в щеткодержатель и изготовление узла последнего. Эта процедура включает управление манипулятором и введение щеток.

Рис. 8.12. Щеткодержатель

Рис. 8.13. Установка для сборки щеткодержателя:

а — схема размещения оборудования; б — манипулятор установки щеток



Сначала система приводится в исходное положение, и новый щеткодержатель подается манипулятором в приспособление из магазина щеткодержателей. Затем в щеткодержатель вводятся четыре щетки. Для выполнения этой задачи новые щетки, свисающие со стержней, перемещаются по ним одна за другой в точку, где телевизионные камеры могут видеть их, причем положение и направление щеток измеряются системой управления.

После обработки данных, полученных с помощью телекамер, щетка захватывается и переносится на сборочное приспособление, где каждая из них размещается поочередно на одной из четырех направляющих и вталкивается в щеткодержатель. После четырехкратного выполнения операции заталкивания щетки собранный щеткодержатель убирается манипулятором и укладывается в магазин.

Алгоритм процесса сборки щеткодержателя показан на рис. 8.14. Положения и направления щеток определяются наблюдением с двух разных точек двумя телевизионными камерами, размещенными под углом  $90^\circ$  друг к другу (рис. 8.15, а). Система включает камеры 1 и 2, стержень 4 и щетку 3, причем камера 2 зафиксирована в пространстве, а камера 1 перемещается («движущийся глаз»).

Принципиальная схема измерения изображена на рис. 8.15, б.

В принятой системе координат оси  $X$  и  $Y$  совпадают с осями телекамер 1 и 2 соответственно, а ось  $Z$  направлена вверх.

Точки  $K_1(A, 0, 0)$  и  $K_2(0, B, 0)$  обозначают положения камер 1 и 2, а точка  $G(x, y, z)$  — положение центра тяжести щетки. Данные,

полученные в результате анализа телевизионных изображений, описывают проекции точки  $G$  из точки наблюдения на плоскости с координатами  $x=0$  и  $y=0$ . Проекция изображения обозначены через  $y_A, z_A, z_B$  и  $x_B$  (на рисунке проекции  $z_A = z_B = 0$ ). В системе этих переменных получают следующие уравнения для вычисления неизвестных  $x, y$  и  $z$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{y_A^2 + z_A^2}}{A} = \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{A - z};$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{z_A^2 + x_B^2}}{B} = \frac{\sqrt{z^2 + x^2}}{B - y};$$

$$z = \frac{(A - x) z_A}{A} = \frac{(B - y) z_B}{B},$$

где  $A, B$  — расстояния между началом координат 0 и точками  $K_1, K_2$  соответственно.

При определении положения щетки используют две координатные системы (рис. 8.15, в). Одна из них — базовая — описана выше, другая —  $Oxyz$  — связана со щеткой. Поэтому положение наблюдаемой щетки определяется ее поворотами  $\varphi_x, \varphi_y$  и  $\varphi_z$  вокруг осей  $X, Y, Z$  базовой системы координат. Между двумя координатными системами существует следующее уравнение связи:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \varphi_x \cos \varphi_y & -\cos \varphi_x \sin \varphi_y & \sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z & \sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \\ \sin \varphi_x \cos \varphi_y & \cos \varphi_x \cos \varphi_y & -\sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z & -\sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \\ -\sin \varphi_x & \cos \varphi_x & \sin \varphi_y \cos \varphi_z & \sin \varphi_y \sin \varphi_z \\ \sin \varphi_x \cos \varphi_y & \cos \varphi_x \cos \varphi_y & -\sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z & -\sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

Так как размеры щетки известны, можно определить элементы матрицы в приведенном уравнении подстановкой данных, полученных из анализа изображений. Следовательно, можно получить три угла поворота  $\varphi_x, \varphi_y$  и  $\varphi_z$ .

После определения положения щетки манипулятор разворачивается и захватывает ее. Однако ввиду малых размеров щетки в процессе наблюдения ее телекамерами, в процессе вычислений других операций на результат могут наложиться помехи, что исказит положение ЗУ манипулятора. Но так как манипулятор имеет «глаз», смонтированный на руке, он «смотрит» на щетку уже перед самым захватом. Поэтому после определения положения щетки и ориентации ЗУ манипулятор перемещается по направлению к щетке и «наблюдает» ее повторно. Если позиционная ошибка достаточно мала, манипулятор захватывает щетку; в противном случае выполняется операция корректировки координат детали, чем достигается высокоточное определение ее координат и надежный захват.

В процессе соединения отдельных деталей в функциональные узлы (сборочные единицы и изделия) прежде всего обеспечивается необходимое относительное положение деталей перед сопряжением (взаимное — относительное — ориентирование). От качества относительного ориентирования еще больше возрастает при проведении сборки с помощью ПР. Это определяется тем, что точность позиционирования исполнительных органов роботов часто оказывается недостаточной, а также влиянием различий в размерах деталей, находящихся в пределах допусков. Поэтому базирующие органы автомата

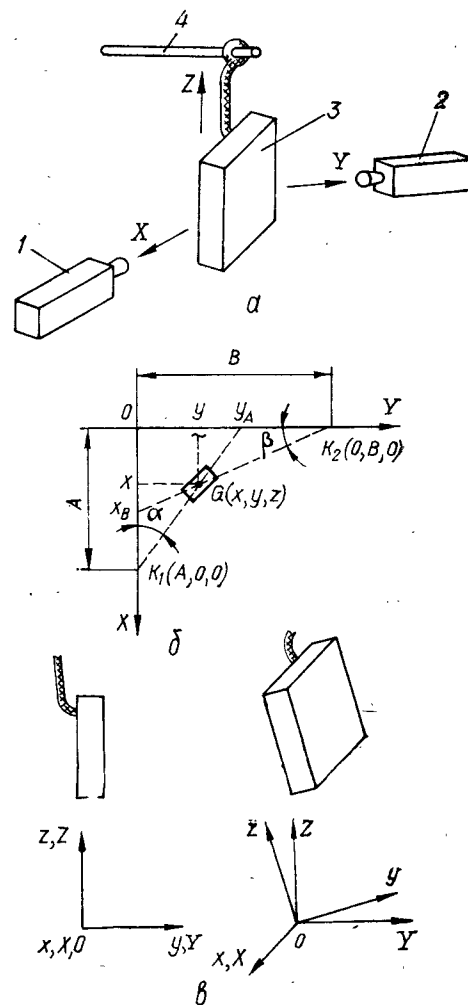


Рис. 8.15. Положения щетки в пространстве  
а — относительное положение щетки и телекамер;  
б — схема измерения; в — схема определения углов поворота щетки

Рис. 8.14. Алгоритм процесса сборки щеткодержателя

динатными системами существует следующее уравнение связи:

и ЗУ манипулятора оснащаются соответствующими элементами, обеспечивающими необходимую точность расположения деталей перед сборкой независимо от того, с какой точностью детали подаются на сборочную позицию.

Рассмотрим один из способов корректировки относительного положения деталей перед сборкой. Манипулирующее устройство, реализующее данный способ (рис. 8.16), состоит из двух частей: базовой, представляющей собой часть стола сборочного автомата, и питателя в виде руки робота, в ЗУ которого формируются команды, необходимые для изменения положения базовой части. На последней могут размещаться самые различные детали — корпуса, плиты с отверстиями, штыревые и стержневые детали, втулки, шестерни и т. д. В захвате размещаются валы, винты, гайки, втулки, а также другие детали, комплектующие с базовой деталью.

В устройстве производится ориентирование втулок относительно валика, находящегося в ЗУ робота. На столе (базе) 2 расположена втулка 3, с которой сопрягается валик 4, зажатый в пальцах 5 захватного устройства, установленных на шарнирах центральной колонки 9. Из-за смещения  $e$  осей валика и отверстия втулки сборки

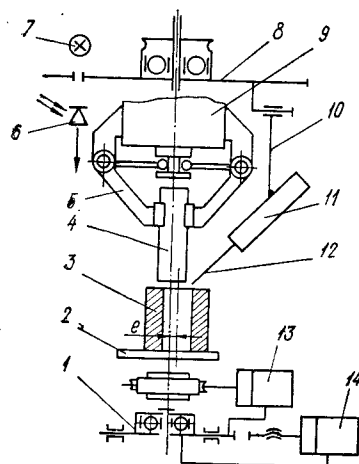


Рис. 8.16. Манипулирующее устройство с игольчатым индуктивным датчиком

затруднена. Поэтому смещение должно быть сведено до такой малой величины  $e \geq 0$ , при которой соединение деталей может быть осуществлено.

Для устранения смещения (т. е. для проведения относительного ориентирования) необходимо определить его значение и направление. Для этого устройство оснащено индуктивным датчиком 11, заканчивающимся иглой 12. Корпус датчика крепится подвижно с помощью кронштейна 10 к вращающемуся диску 8 с отверстием. Над диском находится осветитель 7, а под диском — оптрон 6. При вращении диска 8 датчик под действием сил инерции устанавливается в положение, показанное на рисунке. При остановке диска датчик отводится в сторону пружиной (на рисунке не показана), освобождая тем самым рабочую позицию. Если смещение  $e \neq 0$ , в катушке датчика наводится ЭДС, так как магнитный поток, возбуждаемый постоянным магнитом, изменяется. Изменение магнитного потока определяется тем, что в процессе вращения игла 12 датчика перемещается как над торцевой поверхностью втулки, так и над ее отверстием. Величина выходного сигнала катушки датчика пропорциональна частоте вращения диска 8. Базовый стол 2 и платформа 1 приводятся в движение двигателями 13 и 14 соответственно.

Так как положение и размеры кронштейна, на котором крепится датчик, легко регулировать, а датчик может поворачиваться относительно оси кронштейна, устройство легко и просто перенастраивается на сборку других типоразмеров деталей как по их сечению, так и по длине. Управляющий сигнал  $U_v = f(t)$  легко регулируется по величине, поскольку напряжение  $U_v$  зависит от частоты вращения диска, на котором размещен датчик (чем больше частота вращения, тем больше напряжение  $U_v$  и наоборот). Следовательно, в данном устройстве имеется возможность просто регулировать чувствительность первич-

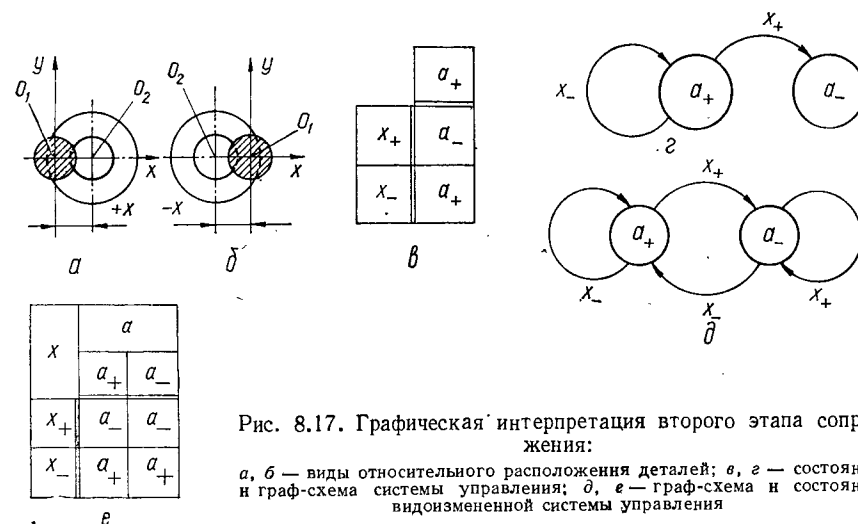


Рис. 8.17. Графическая интерпретация второго этапа сопряжения:

а, б — виды относительного расположения деталей; в, г — состояния и граф-схема системы управления; д, е — граф-схема и состояния видоизмененной системы управления

ного преобразователя (т. е. точность установки одной детали по сопрягаемым поверхностям другой детали).

Рассмотренное устройство можно видоизменить: вместо одного датчика на диске размещаются два (один напротив другого). Второй датчик играет роль компенсирующего звена, исключающего погрешности измерения, если втулка на базовом столе расположена с перекосом. Игла второго датчика должна так размещаться над втулкой, чтобы ее конец не проходил над отверстием.

Кроме того, второй (либо третий и т. д.) датчик целесообразно использовать при сборке соединений некруглого поперечного сечения.

Положения втулки и вала после первого этапа ориентирования показаны на рис. 8.17, а, б. Необходимая процедура переключений двигателя 14 (см. рис. 8.17) на втором этапе представлена таблицей состояний (рис. 8.17, в), строки которой соответствуют разным входным сигналам. В вертикальном столбце изображены состояния системы: исходное  $a_+$  и те, в которые система переходит в зависимости от входного сигнала. Как следует из таблицы, при положительном входном сигнале (смещении)  $x_+$  система переходит в противоположное состояние  $a_-$ , а при отрицательном сигнале  $x_-$  — остается в исходном состоянии.

Программа управления для двигателя линейного перемещения платформы задается с помощью направленного графа (рис. 8.17, *г*). Из графа следует, что требуемая программа действий реализуема и при большей неопределенности в системе управления, когда начальное направление вращения двигателя не фиксировано и может быть как правым, так и левым. Для этого данный граф (рис. 8.17, *г*) преобразуется в другой (рис. 8.17, *д*). Таблица состояний (рис. 8.17, *е*) для данного случая включает два столбца соответственно двум направлениям вращения двигателя.

Для реализации такой схемы управления требуется элемент памяти, который, запоминая амплитудные значения  $\Delta$  сигнала  $U_b$  и сравнивая его с текущими значениями  $U_b$ , устанавливает необходимость реверса двигателя. Если амплитуда  $\Delta$  возрастает, система управления выдает команду на реверсирование, если уменьшается — такой команды не поступает.

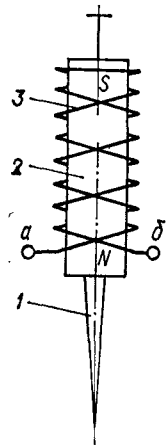


Рис. 8.18. Индуктивный датчик

Использованный в устройстве датчик (рис. 8.18) состоит из постоянного магнита 2 с магнитопроводом 1 в форме иглы и измерительной бифилярной катушки 3. В катушке при вращении датчика вокруг оси вала наводится ЭДС от изменения магнитного потока, возбуждаемого магнитом 2 и зависящего от магнитного сопротивления системы, в которую входит также собираемая втулка. Вследствие этого смещение оси ее отверстия относительно оси вала приводит к изменению магнитного потока датчика. Так как обмотка датчика бифилярная, сигнал, индуцируемый в ней внешним электромагнитным полем, на выводах *а* и *б* всегда одного знака и одинаковой величины. Поэтому на выходе усилителя сигнал помехи равен нулю. В качестве первичного преобразователя может быть использован различного типа датчик (лазерный, ультразвуковой, пневматический и пр.).

При автоматизации технологических процессов широко применяются те устройства робототехники, отдельные органы которых выполняют сразу несколько функций. Тем самым существенно упрощается как конструкция, так и система управления автоматизированным оборудованием. В частности, широко используются устройства, совмещающие в одном органе функции базирования, контроля и ориентирования.

Одно из таких устройств (рис. 8.19) основано на принципе центробежного регулятора, применяемого в двигателях внутреннего сгорания. Устройство состоит из нижней и верхней частей. На нижней устанавливается втулка 7, которая подается на сборку отдельным манипулятором. Верхняя часть представляет собой сменную головку другого манипулятора, захватывающую, перемещающую и устанавливающую валик. В нижней части устройства размещен центрователь, обеспечивающий относительное ориентирование обеих деталей; назначение верхней части — подать валик и выполнить его сопряжение с втул-

кой. Центрователь 16 заканчивается диском 10 с прорезями по числу рычагов 6, снабженных грузами 12 на нижних концах. Втулка 7 подается манипулятором на диск 10. Валик 4, сопрягаемый с втулкой помещается в ЗУ, выполненное в виде цанги 3.

Когда центрователь не вращается, рычаги 6, установленные на осях 11, разведены пружинами 13 и находятся в крайнем нижнем положении под диском 10; при вращении грузы 12 рычагов расходятся, заставляя последние переходить через прорези в диске и смыкаться над втулкой 7. В этом движении рычаги через пружины 13 перемещают крестовину 14 вверх, которая жестко связана с конусом 9. Поэтому конус центра входит в отверстие втулки и центрирует ее. Втулка, поднимаясь, упирается в пальцы 5, установленные в рычагах 6. Таким образом, она базируется на этих пальцах и подпирается конусом.

Когда толкатель 2 идет вниз, валик 4 проходит между концами рычагов 6, которые центрируют его по отверстию втулки 7. При дальнейшем движении толкателя вниз торец цанги 3 упирается в пальцы 5, утапливая их. Поскольку толкатель идет вниз дальше, то цанга перемещается относительно него вверх, сжимая пружину 1. Валик 4 под действием толкателя проходит между рычагов 6 и попадает в отверстие втулки 7. Таким образом валик освобождается от ЗУ с одновременной центровкой по отверстию сопрягаемой втулки. На этом сборка заканчивается. Вращение центрователя прекращается, и рычаги 6 с конусом 9 опускаются вниз, причем рычаги уходят через прорези под диск 10, освобождая сборочную позицию. Собранный узел удаляется. На его место поступает втулка, а в ЗУ — новый валик.

Особенность данного устройства заключается в том, что оно одновременно с базированием и ориентированием деталей может выполнять функции контрольного механизма, определяющего диаметральный зазор в сопряжении. Последнее обусловлено тем, что положение конуса 9 относительно втулки 7 характеризует диаметр ее отверстия, а положения концов рычагов 6 — диаметр валика 4. Действительно, если диаметр валика больше максимально допустимого, рычаги 6 потеряют контакт с центрователем 16, так как отойдут от последнего, когда валик попадает между рычагами.

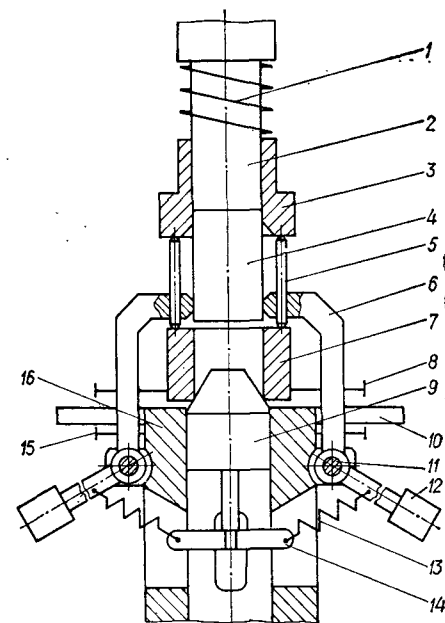


Рис. 8.19. Центробежный центрирующий механизм

Аналогично, если диаметр отверстия втулки меньше своего минимально допустимого, положение крестовины 14 будет ниже некоторой фиксированной величины (высоты) относительно центрователя.

Поэтому в устройстве имеется возможность осуществить отбраковку той пары сопрягаемых деталей, которые по своим параметрам не удовлетворяют задаваемым условиям. В этом случае у одного из рычагов 6 и крестовины 14 располагаются датчики, например электроконтактные, сигналы с которых устанавливают нужное соответствие размеров сопрягаемых поверхностей, а при необходимости дают команды развести манипуляторы с обеими деталями.

В положении, показанном на рисунке, втулка 7 вращается вместе с диском и конусом, однако, из-за инерционности это вращение является отстающим. Последнее приводит к лучшему центрированию втулки на корпусе (самоцентрирование). Кроме того, поскольку валик 4 не вращается, происходит еще и его самоцентрирование по втулке 7.

Таким образом, подобное устройство легко превращается в адаптивное, не только оценивающее параметры сопряжения и на этой основе выдающее соответствующие команды, но и определяющее характер протекания самого сборочного процесса. Действительно, если по каким-либо причинам сборка не произойдет, т. е. валик не будет входить в отверстие втулки, то, измеряя нарастание осевого усилия на толкателе 2, можно выключить механизмы сборки и подать команды на разведение данной пары деталей. Регулировка положения втулки 7 и центрователя 16 осуществляется винтами 8 и 15 соответственно.

В устройстве центрователь обеспечивает базирование втулки и валика, а также относительное ориентирование обеих деталей. Таким образом существенно упрощается система сборочного устройства, в котором отпадает необходимость применения специальных датчиков опознавания положения сопрягаемых деталей. Подобные устройства могут быть разнообразного конструктивного исполнения и по-разному монтироваться в ЗУ манипуляторов [78].

## Глава IX

### АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 1. ГИБКИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Использование транспортных систем (ТС) с адресованием, управляемых от ЭВМ, позволяет осуществлять диспетчеризацию потоков исходных материалов и готовых изделий между РТК соответствующих назначений, обеспечивая их интеграцию в робототехнические переналаживаемые системы (РТПС) вплоть до организации гибких роботизированных производств (ГРП).

Гибкие роботизированные производства, базирующиеся на РТПС, содержат все элементы промышленного производства (рис. 9.1), в том числе системы:

автоматизированного проектирования выпускаемой продукции (САПР «Изделие»);

автоматизированной разработки технологических процессов изготовления продукции (САПТ);

автоматизированной разработки мероприятий организационно-экономического планирования (САОЭП);

автоматизированного проектирования робототехнических комплексов (САПР РТК), осуществляющих непосредственный выпуск заданной промышленной продукции;

автоматизированного хранения и накопления исходного материала — автоматизированный склад заготовок (АСЗ) и автоматизированный склад готовой продукции (АСГП);

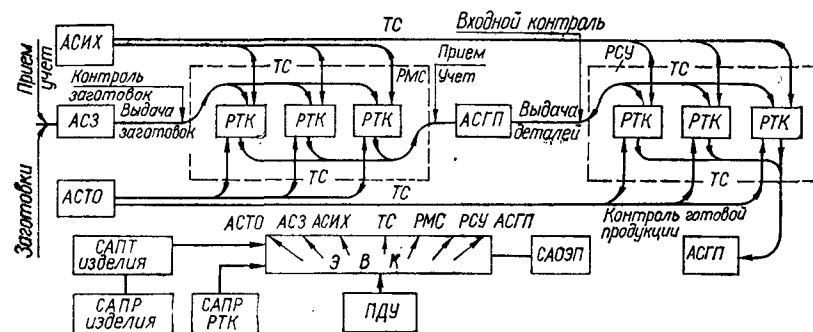


Рис. 9.1. Структурная схема гибкого роботизированного производства

автоматизированного хранения инструмента и технологической оснастки (соответственно АСИХ и АСТО);

транспортные, осуществляющие транспортирование и переадресацию материальных потоков между накопителями и РТПС различного назначения (механообрабатывающими РМС и сборочными РСУ);

информационного обеспечения ГРП и контроля продукции. Кроме того, в ГРП входят электронно-вычислительный комплекс (ЭВК), а также центральный и локальный пульты диспетчерского управления (ПДУ).

Несмотря на очевидные преимущества ГРП, имеются серьезные причины, сдерживающие широкое внедрение их в промышленности, и, прежде всего, — слабое использование принципов системного проектирования при создании ГРП, которое требует развития методологии проектирования, рассматривающей разработку отдельных модулей как функциональных частей ГРП с учетом задач, решаемых ими в целом.

#### 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

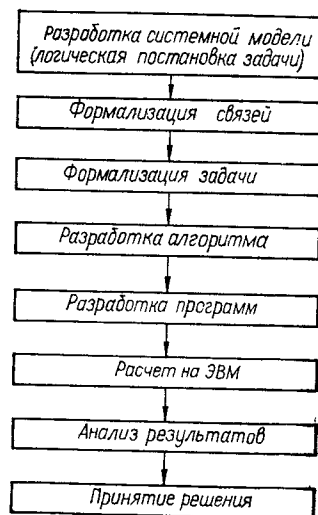
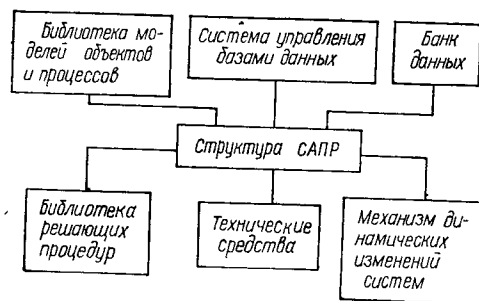
Характерными недостатками традиционных методов проектирования являются: недостаточный анализ и учет взаимосвязей между отдельными элементами проектируемых комплексов, наличие субъек-

тивизма при принятии проектировщиком отдельных решений, ограниченность в сопоставлении и оценке вариантов решения поставленной задачи. Устранение этих недостатков возможно при создании систем проектирования, основанных на применении современных математических методов и средств вычислительной техники на всех этапах процесса проектирования, т. е. систем автоматизированного проектирования.

Система автоматизированного проектирования (САПР) — это организационно-техническая (человеко-машинная) система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных

Рис. 9.2. Функциональные элементы САПР

Рис. 9.3. Схема этапов создания САПР



с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователем системы), и выполняющая автоматизированное проектирование. Комплекс средств автоматизации проектирования состоит из совокупности средств методического, организационного, информационного, программного и технического обеспечения.

В соответствии с требованиями системного подхода разработка САПР должна удовлетворять следующим принципам [47].

**Блочный-модульный принцип построения.** Система состоит из отдельных частей, имеющих функциональную и качественную определенность, и формируется не за один процесс, а отдельными участками (блоками, модулями), например, блок ограничений, блок кинематического анализа, модуль расчета растягивающих усилий и т. д.

**Принцип информационного единства.** Все потоки информации в системе должны быть совместимы. Для описания информации необходимо ввести один язык, единую систему отсчета, общую идентификацию. Для формирования и работы с программами управления проектированием удобно использовать проблемно-ориентированные языки, которые строятся двумя способами: с помощью дескрипторов (ключевых

слов) и командных процедур или добавлением специальных процедур в универсальные алгоритмические языки.

**Принцип адаптации и развития.** Система проектирования должна быть приведена в соответствие со сложившейся практикой проектирования.

**Принцип иерархии.** Подразумевается не только иерархическое строение моделей и процессов, но и иерархия задач, критериев и т. д.

**Принцип итераций.** Система работает по принципу последовательных приближений (метод итераций). Это обусловлено тем, что многие параметры на начальной стадии проектирования задаются из статистических соображений, а затем уточняются.

Структура САПР (рис. 9.2) состоит из следующих функциональных элементов:

библиотеки математических моделей объектов и процессов проектирования;

библиотеки решающих процедур или операционных программ проектирования, отображающих логическую схему построения проекта;

системы управления базами данных и технологии разработки прикладных, системных и сервисных программ;

банка данных, который представляет собой совокупность сведений об окружающей среде, в той или иной мере участвующих в информационном обеспечении процесса проектирования;

системы построения новых решающих процедур преобразования и обновления информации в базах данных (механизм динамических изменений системы);

совокупности программно-управляемых технических средств сбора, передачи, накопления, отображения, документирования информации и их базового программного обеспечения (технические средства).

В общем виде этапы создания оптимальных технических систем показаны на рис. 9.3.

### 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РТК

**Методология построения САПР РТК.** Наиболее трудоемкими этапами автоматизированного проектирования являются алгоритмизация его процессов, программирование алгоритмов и отладка программ на ЭВМ, которые могут занимать от нескольких человеко-месяцев до нескольких человеко-лет. Поэтому важно выявить возможность создания (использования) универсальных алгоритмов и программ на основе общности структур элементов функционального назначения, а также проектирования объектов из типовых функциональных элементов с выявленной общностью структур.

Для создания САПР РТК необходимо, в общем случае, решить следующие основные задачи:

разработать формализованный язык описания исходной и справочной информации (т. е. системы кодирования сведений об объекте), переработать ее и выдать результаты на печать или графическое ото-

бражение в виде конструктивных чертежей, принципиальных схем и схем технологических компоновок. Исходной информацией являются данные об условиях работы объекта проектирования и о свойствах объекта роботизации. Справочная информация — это данные, необходимые для расчета конструктивных и схемных параметров, коэффициентов передачи и временных соотношений, об используемых унифицированных (типовых) модулях РТК и их элементов;

выявить законы структурообразования проектируемых объектов, разработать методы описания структуры, пригодные для алгоритмизации и моделирования процесса проектирования РТК. Для этого необходимо разработать обобщенные структурные схемы РТК, системы управления, выявить количество и параметры унифицированных (типовых) модулей РТК и их элементов;

на основе выявленных законов, принятых методов и формализованного языка описания создать унифицированные алгоритмы и программы проектирования указанных объектов;

создать комплекс технических средств, сопрягаемых с ЭВМ и предназначенных для подготовки исходной информации при вводе в САПР, отображения хода проектирования и оперативной связи с ЭВМ, а также устройств для выдачи результатов проектирования на печать, графопостроители и т. п.

Основу проектирования, таким образом, представляет накопление данных в информационной системе и организация поиска этих данных с требуемым набором характеристик.

Для кодирования информации в рассматриваемой поисковой системе должен использоваться дескрипторный словарь — совокупность нормативных ключевых слов, предназначенных для координатного индексирования документов и информационных запросов. Дескрипторный словарь представляет собой массив информации, составленной в определенной форме в соответствии с принятой классификацией функциональных элементов проектируемого объекта, критериев технико-экономической эффективности выбора варианта, характеристик объекта и его элементов, а также апробированных схемных решений, имеющих наибольшую вероятность применения.

При формализации исходная информация преобразовывается в символы исходной длины. Такой формализации должен предшествовать выполненный на предыдущих этапах процесс систематизации и классификации функциональных элементов объекта проектирования, схемных решений его построения и др.

**Исходные данные и искомые параметры при проектировании РТК.** Для обеспечения возможности проектирования РТК формируется следующая информация: признаки изделий, подлежащих обработке на РТК; виды соединений; характер сопряжения комплектующих сборочное соединение элементов; технологические операции (порядок операций, такты выпуска, характеризующие производительность, время непосредственной обработки или сборки на оборудовании); ограничения на параметры РТК в виде ограничений по скорости выполнения операции; минимально допустимые расстояния между оборудованием из условий техники безопасности и удобства его обслуживания; мак-

симально допустимые вылеты рук обслуживающих роботов. Кроме того, учитываются ограничения на производственные площади, расположение входа и выхода РТК, экономические показатели.

В процессе проектирования РТК определяются: на стадии проектирования — номенклатура основного и вспомогательного оборудования, общие характеристики ПР (грузоподъемность, манипулятивность, точность позиционирования, габаритные размеры с учетом вылета исполнительных органов, базовая система координат, требования к захватным устройствам и составу технологических модулей ПР); непосредственно при проектировании — технологический маршрут изготовления; дифференциация сборочных операций; состав основного и вспомогательного оборудования, в том числе промежуточных накопителей для хранения; количество роботов и их базовые модели, место и способ передачи изделий между роботами, распределение роботов между узловыми точками маршрута (после дифференциации процесса) или распределение функций роботов (при концентрации операций), компоновка роботов и их параметры (состав, ход, количество точек позиционирования и взаимная ориентация степеней подвижности роботов); состав технологических модулей и схемы их компоновок; расположение роботов и технологического оборудования в производственных помещениях; параметры траекторий манипулирования (перемещения захватных устройств роботов); скорости и порядок перемещения захватных устройств по выбранным ранее траекториям; структуры и технологические компоновки РТК.

**Ограничения и связи на варьируемые параметры РТК.** К ограничениям относятся: расположение оборудования в пределах имеющихся производственных площадей на расстояниях друг от друга и от границ этих помещений не менее допустимых; исключение соударений с технологическим оборудованием изделия и элементов робота при всех его планируемых перемещениях; реально достижимые скорости и максимальные перемещения захватных устройств и инструмента; функциональная связь между расположением оборудования, траекториями манипулирования и параметрами роботов, а также между порядком выполнения технологических операций и порядком обслуживания оборудования роботами; такт выпуска изделий.

Выполнение этих и других ограничений должно проверяться с помощью определенных алгоритмов, содержащих как функциональные, так и логические соотношения.

**Критерии сравнения решений РТК.** Обычно существует множество решений, удовлетворяющих поставленным ограничениям. Выбор предпочтительного решения производится по количественным критериям — показателям эффективности, наилучшим образом отражающим целевую направленность проектирования. Применительно к проектированию РТК такими критериями могут быть народнохозяйственная эффективность или срок окупаемости дополнительных капитальных вложений; социальный эффект от роботизации. Для определения показателей эффективности необходимо установить их функциональную зависимость от заданных и искомых параметров РТК. Так как большинство составляющих эффективности для близких сравниваемых

вариантов оказываются также близкими, характеризовать эффективность могут только дополнительные капитальные вложения в работы и средства упорядочения среды.

Таким образом, задача эффективного проектирования сводится к тому, чтобы при исходных данных и ограничениях найти такую комбинацию искомых параметров РТК, которая обращает показатель эффективности в максимум; такие задачи в теории исследования операций решаются методами математического программирования. Однако применение этих методов к решению задачи проектирования РТК затруднено большой размерностью задачи, сложностью ограничений, функциональных связей и целевой функции. Поэтому используется метод приближенного решения, заключающийся в следующем:

рассматриваются не все возможные решения, а только относящиеся к типовым организационным и компоновочным, практикуемым в робототехнике;

решения выбираются не по общему критерию, а по частным ранжированным критериям (минимизация количества роботов, степеней подвижности, числа технологических модулей, ходов, скоростей, количества точек позиционирования и т. д.). Найденные таким образом состав и параметры вспомогательного оборудования РТК сравниваются с характеристиками выпускаемых технических средств и выбираются базовые для использования в РТК либо для дальнейшей модернизации с учетом специфики объекта роботизации.

#### 4. ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР РТК

Многоцелевая оптимизация при разработке САПР РТК может быть частично упорядочена при использовании системных моделей САПР [54]. Поскольку разные виды обеспечения САПР взаимосвязаны, многоцелевая оптимизация сводится к одноплановой за счет ранжировки и упорядочения, а также взаимосвязанного отображения задач разработки.

Применяя системную модель, можно упорядочить задачи в такую логическую последовательность видов разработки: методического обеспечения — организационного обеспечения — информационного обеспечения — математического обеспечения (системного и прикладного) — состава технических средств.

При этом учитывается содержание видов обеспечения автоматизированного проектирования, а именно: *методическое обеспечение* — совокупность документов, устанавливающих состав, правила отбора и эксплуатации средств обеспечения; *организационное обеспечение* — совокупность и форма документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции; *информационное обеспечение* — совокупность сведений, представленных в заданной форме; *программное обеспечение* — совокупность машинных программ, представленных в заданной форме; *техническое обеспечение* — совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств выполнения автоматизированного проектирования.

Виды обеспечения САПР РТК можно представить топологической моделью — иерархической системой графов (рис. 9.4), на которой показаны взаимодействие частей САПР, а также взаимное отображение межуровневых отношений.

На верхнем уровне иерархии находится методическое обеспечение, которое позволяет отобразить процесс задания и прохождения проекта в САПР по уровням системной модели разрабатываемого объекта и гарантировать реализацию оптимальных методик проектирования (т. е. методическое обеспечение — это инструкция по работе с моделью, которая должна содержать описательную и преобразующую части проекта). В свою очередь, методическое обеспечение представляет собой также иерархическую структуру, включающую внешнее и внутреннее методические обеспечения.

К внешнему обеспечению относятся руководящие методические материалы и частично методы моделирования САПР, к внутреннему — алгоритм системного проектирования и также методы моделирования САПР. Задача внешнего организационного обеспечения САПР заключается в установлении оптимального вза-

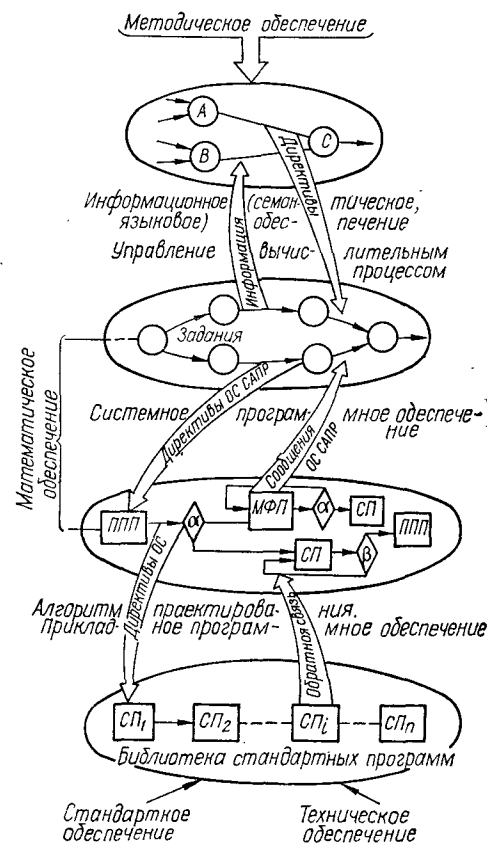


Рис. 9.4. Топологическая модель обеспечения САПР РТК

имодействия частей системы для достижения ее оптимальных характеристик. Связи взаимодействия устанавливаются как сверху вниз, так и слева направо в соответствии с этапами жизненного цикла объекта проектирования.

Для реализации управления вычислительным процессом на основе системного программного обеспечения необходима разработка языковых средств (языков программирования), входящих в информационное обеспечение, которое представляет один из уровней системной модели и позволяет задавать и отображать возможные альтернативы при проектировании. Конкретная реализация альтернатив осуществляется средствами математического и технического обеспечений. Языки представляют собой процедурную часть информационного обеспече-

ния, и для описания и наполнения входной, выходной и промежуточной информации необходимы соответствующие средства — библиотеки, архивы, банки данных и др. В этой части обеспечения САПР РТК практически не отличается от других вычислительных информационно-поисковых систем.

С точки зрения внешнего информационного обеспечения задача заключается в разработке удобных для человека средств общения с проектирующими программами.

Основу математического обеспечения САПР РТК составляет системное и программное обеспечение. В свою очередь последнее состоит из стандартного и проблемно-ориентированного, представляющих собой наборы программных модулей, пакетов прикладных программ проектирования, физических расчетов и моделей. При этом любая задача из списка или составная ее часть может быть решена соответствующей программой или подпрограммой. Таким образом, с точки зрения математического обеспечения автоматизация проектирования сводится к обеспечению в нужное время и заданном месте посылки требуемого модуля.

Техническое обеспечение САПР РТК — это техническая система в общем случае с переменным составом (структурой), отображаемым топологическими моделями типа иерархических графов или структурных схем. При этом состав технических средств должен гарантировать решение задач проектирования и обеспечивать условия дальнейшего развития системы. В модели САПР РТК техническое обеспечение представляет самый нижний уровень иерархии, на который нагружен уровень программного (математического) обеспечения САПР.

Задача внешнего технического обеспечения проектирования отождествляется с оптимальным выбором состава технических средств САПР. При этом исходной информацией являются результаты анализа задач внутреннего проектирования в виде состава программных модулей и пакетов прикладных программ, а также требования к техническим средствам в виде критериев и ограничений.

Для САПР, представляющих собой информационно-вычислительные системы, разрабатывается математическое обеспечение, так как основой реализации таких систем являются универсальные средства дискретной вычислительной техники. Если же в качестве пользователя выступает человек или группа людей (как это имеет место при создании САПР РТК), необходимы все виды обеспечения.

## 5. СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ САПР РТК

Структура САПР РТК включает обеспечивающие системы (информационно-поисковая система (ИПС), диалоговая система ввода-вывода, подсистема отображения и документирования, а также мониторинговая система САПР РТК), собственно проектирующие подсистемы САПР РТК и операционную систему ЭВМ. Таким образом, САПР РТК — человеко-машинная система, когда коллектив разработчиков является составной частью системы проектирования и выполняет проектные работы при взаимодействии с ЭВМ.

Если задачи обеспечения являются в определенной мере общими для систем автоматизированного проектирования, то функциональные задачи каждой САПР определяются ее назначением и прикладным характером. В частности, компонентные уровни проектирования сборочных РТК могут быть представлены иерархией задач проектирования (рис. 9.5)

К проектирующим относятся следующие подсистемы САПР РТК (рис. 9.6):

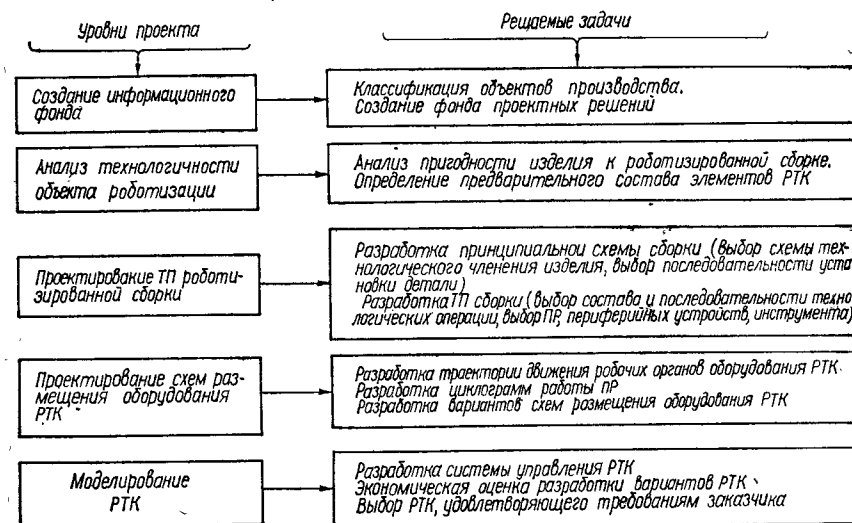


Рис. 9.5. Схема иерархии задач проектирования

анализа сборочного изделия и его элементов на технологичность (подсистема *Изделие*);

проектирования технологического сборочного маршрута (подсистема *Технологический маршрут*);

проектирования промышленного робота и его элементов (подсистема *Промышленный робот*);

проектирования схем размещения оборудования РТК (подсистема *Планировка РТК*);

проектирования систем управления РТК (подсистема *СУ РТК*);

технико-экономического анализа вариантов РТК (подсистема *Моделирование РТК*).

Задание на проектирование РТК поступает к проектировщику, который переносит информацию на машинные носители и через мониторинговую систему САПР подключает первую подсистему — *Изделие*.

Подсистема *Изделие\** предназначена для определения степени пригодности (технологичности) данного объекта к роботизированной сбор-

\* Исследования по разработке подсистемы *Изделие* выполнены инж. М. М. Ткачом под руководством канд. техн. наук Л. С. Ямпольского.

ке; выявления нетехнологичных признаков с целью коррекции объекта (повышение уровня технологичности); предварительного определения состава (номенклатуры) функциональных элементов РТК, обслуживающего данный объект.

Функциональная схема данной подсистемы показана на рис. 9.7. Входом в нее является совокупность свойств детали, а выходом — состав функциональных устройств РТК и базовая модель ПР. Входная информация (информация о детали) вводится проектировщиком непосредственно с дисплея (на котором поочередно высвечиваются признаки классификации деталей) в виде номеров признаков, соответствующих описываемой детали.

Полученная таким образом информация о детали преобразуется в вид, удобный для дальнейшей обработки, — девятиразрядный код, который в дальнейшем сопоставляется с именами таблиц, несущими информацию о функциональных элементах РТК. На основании результатов идентификации кода детали и имени таблицы производится оценка технологичности детали с точки зрения ее пригодности к автоматическому ориентирова-

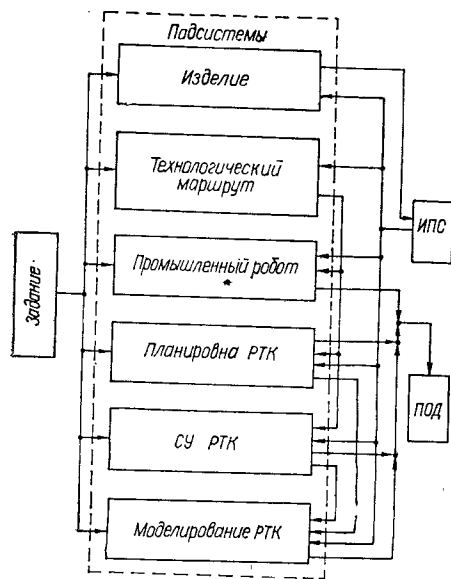


Рис. 9.6. Структурная схема проектирующих подсистем САПР РТК

нию, транспортированию, накоплению и подаче в зону захвата ПР.

Если по результатам идентификации окажется, что деталь нетехнологична, на дисплей выдаются те ее признаки, по которым она не удовлетворяет требованиям технологичности. Такая информация используется на этапе эскизного проектирования и позволяет ввести необходимые изменения в конструкцию детали с целью повышения ее пригодности к роботизированному изготовлению.

Если же деталь окажется технологичной, на дисплей выдается массив функциональных элементов РТК, которые оказались пригодными для обслуживания детали в результате идентификации. Данная информация является необходимой, так как позволяет определить наилучший состав функциональных элементов РТК по тем или другим признакам, либо выбрать отдельные из них исходя из требований технологического процесса сборки. После выбора наилучшего состава функциональных элементов проектировщик формирует задание (запрос) на поиск конструктивных реализаций устройств РТК и базовой модели ПР и вводит его в подсистему, которая по каждому из запросов осуществляет поиск конкретных устройств.

Окончательный выбор реализаций устройств РТК и базовой модели ПР для данного технологического процесса осуществляется с помощью уточняющих параметров, поступающих от других проектирую-

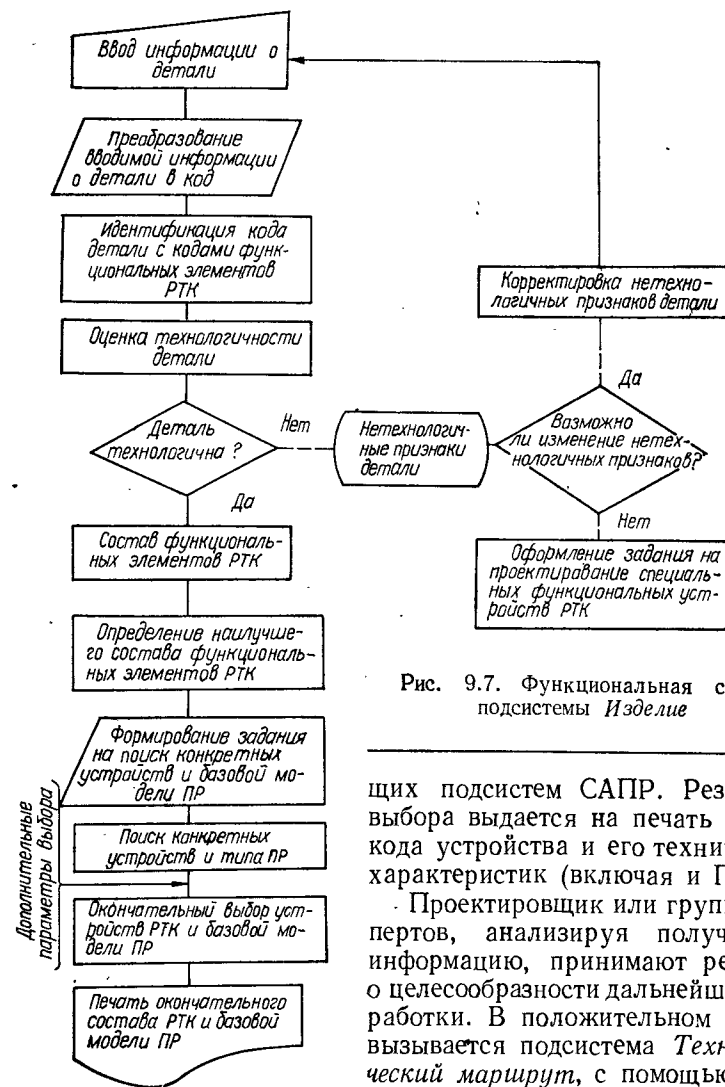


Рис. 9.7. Функциональная схема подсистемы Изделие

щих подсистем САПР. Результат выбора выдается на печать в виде кода устройства и его технических характеристик (включая и ПР).

Проектировщик или группа экспертов, анализируя полученную информацию, принимают решение о целесообразности дальнейшей разработки. В положительном случае вызывается подсистема Технологический маршрут, с помощью которой выбирается схема технологиче-

ского членения сборочного узла; определяется последовательность установки деталей; выбирается последовательность технологических операций (соединение, контроль и др.); для каждой последовательности уточняются поверхности деталей, пригодные к захвату ПР; формируются траектории перемещения деталей в процессе их установки.

Структура сборочного технологического процесса определяется последовательностью установки деталей, что учитывается при разработке принципиальной схемы сборки. Для выявления возможных маршрутов сборки узла используется метод аналитического описания формы и взаимного расположения деталей [41].

На основании допустимой последовательности установки деталей с учетом предварительно выбранных технических средств строятся схемы технологических маршрутов сборки.

Уточнение характеристик базовой модели ПР и степень доработки его функциональных модулей производится подсистемой *Промышленный робот*, которая решает следующие инженерные задачи: производит кинематический и динамический анализ исполнительных механизмов ПР и определяет степень модернизации базовой модели (перевод на дискретные технологические модули, обеспечивающие ориентирующие и транспортные движения захватного устройства и др.); разрабатывает рекомендации по выбору оптимальных условий наложения удерживающих и неисбыточных связей на деталь (соединение) захватным устройством ПР [49].

Подсистема *Планировка РТК* обеспечивает разработку траектории движения рабочих органов оборудования и циклограмм работы ПР; анализ схем размещения функциональных устройств РТК; геометрическое согласование параметров устройств РТК и технологического оборудования.

Подсистема *СУ РТК* предназначена для решения задач, возникающих при разработке системы управления комплексом. К ним относятся: разработка логико-программного управления, т. е. формирование последовательности управляющих команд на исполнительные элементы функциональных устройств РТК, включая исполнительную систему ПР; решение задачи исключения формирования ложных управляющих сигналов; выбор состава технических средств СУ РТК.

Подсистема *Моделирование РТК* выполняет технико-экономический анализ разработанных вариантов РТК, состоящий из оценки технико-экономических параметров этих вариантов; определения надежности функционирования РТК; выбора вариантов РТК, наиболее полно удовлетворяющих требованиям на разработку.

Если полученное в результате работы САПР техническое решение удовлетворяет требованиям заказчика, обеспечивается выпуск на печатающих и графических устройствах технических документов согласно ГОСТ 2.004—79. Эти функции в САПР выполняет подсистема *Отображение и документирование*.

Обслуживающая подсистема *Ввод-вывод* предназначена для формирования текстового и (или) графического изображения на дисплее и обеспечивает визуальное наблюдение проектировщика за результатами проектирования, а также эффективное взаимодействие пользователя с САПР РТК в интерактивном режиме.

Для ускоренной оценки пригодности объекта к роботизированному изготовлению по ограниченному составу признаков предусмотрен ввод информации об объекте с помощью идентифицирующих матриц, исключающий предыдущее кодирование. Такими признаками могут

служить: форма объекта, расположение центра тяжести, моменты инерции относительно осей симметрии, наличие характерных признаков (сквозные отверстия, пазы, выступы и т. д.).

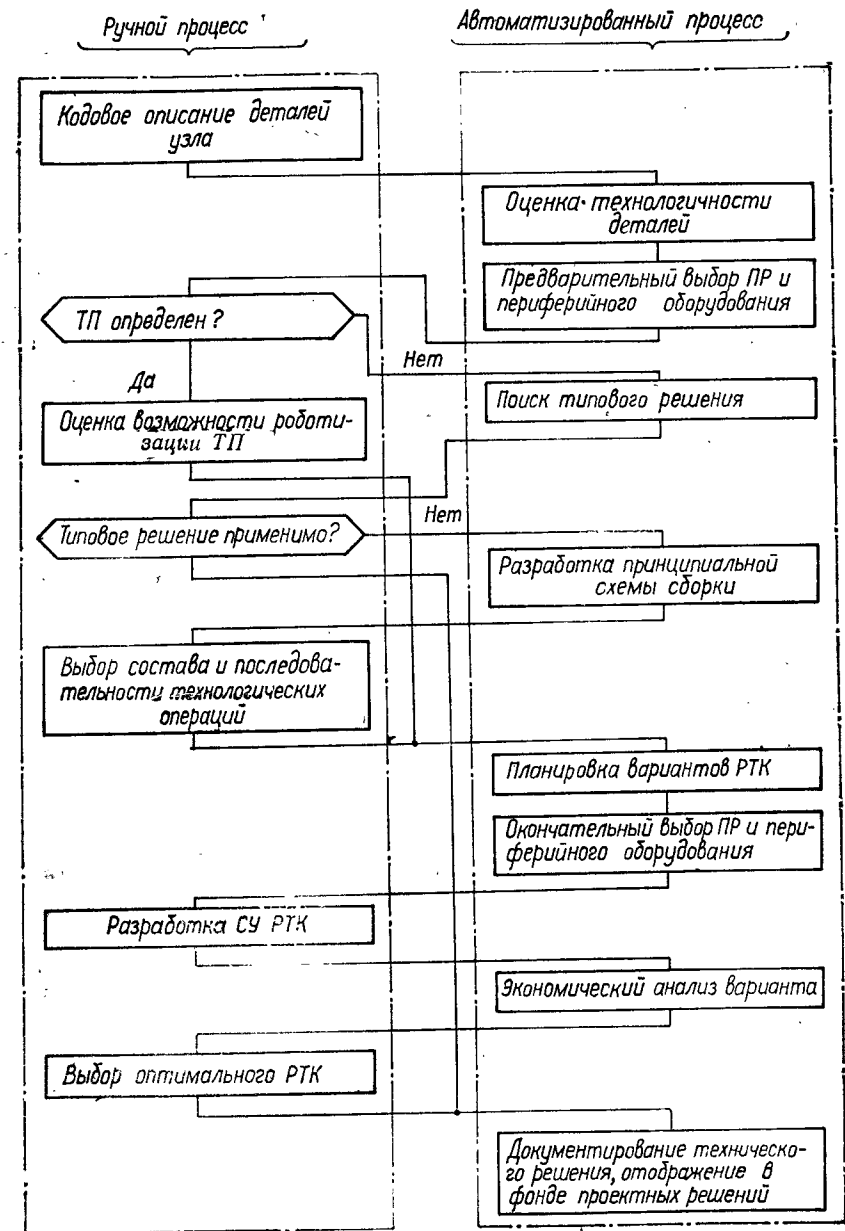


Рис. 9.8. Логическая схема процесса автоматизированного проектирования

Информационно-поисковая подсистема имеет структуру, позволяющую выдавать информацию на запросы проектирующих подсистем или непосредственно человека-проектировщика. В ее функции входит: сбор, подготовка, ввод и вывод (интерпретация запросов), хранение, поиск и корректировка информации, а также занесение в банк данных новой информации. На рис. 9.8 показана логическая схема процесса автоматизированного проектирования РТК механосборочного производства. В ней отображены основные этапы работ и логические связи действий, направленных на создание системы, позволяющей спроектировать наилучшим образом РТК по сборке заданного технического объекта.

Логическая схема автоматизированного проектирования учитывает два подхода к созданию роботизированных сборочных производств:

ПР и технические средства упорядочивания среды встраиваются в существующий технологический процесс, который определен; технологические роботизированные линии проектируются на основе анализа процесса и сборочного изделия с точки зрения возможности его автоматизированного изготовления.

Подсистемы *Изделие*, *Технологический маршрут*, *Промышленный робот* представляют законченный цикл анализа объекта роботизации и выбора состава РТК, реализующего разработанный технологический сборочный маршрут. Как показала практика, формирование проектных решений с помощью САПР позволяет сократить в 2—3 раза сроки проектирования, уменьшить влияние субъективного фактора при принятии решения и улучшить качество проекта.

## 6. МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ОБЪЕКТОВ РОБОТИЗАЦИИ \*

Применение ЭВМ в технологическом проектировании оказывает влияние не только на решение, но и постановку технологической задачи. В связи с тем что при существующем уровне развития вычислительной техники исходная информация в виде чертежей объектов проектирования, оснастки, паспортов оборудования не может быть воспринята непосредственно ЭВМ, необходим метод формального представления информации в форме, удобной для ввода в ЭВМ.

В настоящее время разработан ряд методов формализованного описания деталей. С помощью одних (например, метода системно-структурного анализа сложных объектов) создается формализованный технологический язык (ФТЯ), с помощью других получают аналитическое описание геометрии детали. В первом случае пространственный образ детали формируется в виде совокупности объемных элементов и поверхностей, которые задаются специально разработанными кодами.

Основные принципы построения формализованных технологических языков, применяемых в автоматизированных системах техноло-

гической подготовки производства (АСТПП), состоят в том, что деталь представляется как система, состоящая из множества элементов, связанных между собой для выполнения какой-либо функции. Наиболее распространенные методы рассмотрены ниже.

*Проекционный* — основан на описании проекций объекта на плоскости координат. В качестве смысловых единиц формального языка выступают такие элементы описания, как точка, дуга, окружность, отрезок прямой, отрезок произвольной линии [59]. Связи между этими элементами устанавливаются указанием координатных точек их пересечения. Этот метод применяется при разработке программ для станков с ЧПУ, а также для описания информации, выводимой на чертежно-графические автоматы. Так как метод требует сложного логико-математического аппарата распознавания проекций объекта в пространстве, он не применяется при проектировании технологических процессов. В этом случае используют *конструктивный* метод, который состоит в том, что в конфигурации детали выделяют пространственные фрагменты, информа-

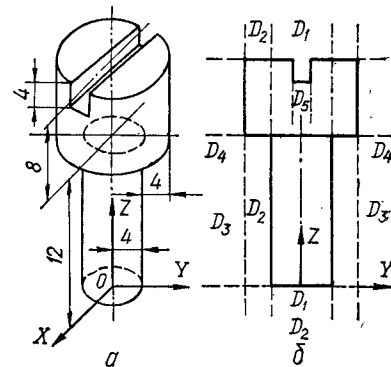


Рис. 9.9. Интерпретация описываемой детали: а — общий вид; б — сечение с обозначением поверхностей

ция о которых вместе со связями представляет формальное описание структуры детали. Примером такого метода может служить система кодирования КОД-78, предназначенная для деталей типа тела вращения.

Для аналитического описания сложных геометрических объектов используется, например, *метод R-функций* [58]. Этот метод позволяет составлять уравнения сложных чертежей пространственных объектов, а также уравнения семейств элементов объекта, включающих его заданный геометрический образ. Суть метода в том, что указывается способ построения алгебраической функции координат  $F(X, Y, Z)$ , которая во всех точках контура положительна, вне контура отрицательна, а на границе обращается в нуль. Пусть, например, необходимо описать поверхность детали, изображенной на рис. 9.9, а. Поверхность детали может быть составлена из следующих областей:

бесконечного цилиндра ( $D_1$ ), определяемого неравенством 16 —  $x^2 - y^2 \geq 0$ ;

бесконечного цилиндра ( $D_2$ ), определяемого неравенством 64 —  $x^2 - y^2 \geq 0$ ;

слоя ( $D_3$ ), заключенного между плоскостями  $z = 0$  и  $z = 12$ ;

слоя ( $D_4$ ), заключенного между плоскостями  $z = 0$  и  $z = 20$ ;

бесконечной призмы ( $D_5$ ) с ребрами, параллельными оси  $O_x$ , имеющей в перпендикулярном сечении прямоугольник (рис. 9.9, б). Область,

\* Исследования, описанные в параграфах 6, 7 данной главы, выполнены инж. О. М. Калиным под руководством канд. техн. наук Л. С. Ямпольского.

определяющая рассматриваемую деталь, выражается логической формулой

$$D = [(D_1 \wedge D_4) \vee (D_2 \wedge D_4 \wedge \bar{D}_3)] \wedge \bar{D}_5.$$

Уравнение поверхности детали записывается в виде

$$\{[(16 - x^2 - y^2) \wedge (20z - z^2)] \vee [(64 - x^2 - y^2) \wedge (20z - z^2) \wedge (z^2 - 12z)] \wedge [-5 + y^2 + (z - 18)^2 + |3 - (z - 18)^2 + y^2|] = 0.$$

Метод  $R$ -функций применяется для решения многих задач математической физики, механики, оптимального раскроя, машинного распознавания геометрических образов и т. д.

Применение аппарата аналитической геометрии или аппарата дискретных функций позволяет описывать геометрические объекты достаточно точно, но в этом случае возрастает количество параметров описания, усложняются функциональные связи между ними. Для технологического проектирования с применением ЭВМ удобней пользоваться приближенными методами, описывающими геометрические объекты с достаточной точностью.

В частности, используется метод формального описания формы и пространственного расположения деталей в сборочном узле, в котором геометрический образ объекта представляется в виде *математической координатной модели* (МКМ). МКМ содержит информацию о геометрии объекта в виде координат поверхностных точек, которые определяются из уравнений поверхности, заданных в параметрической форме:

$$x = x(u, V); \quad y = y(u, V); \quad z = z(u, V). \quad (9.1)$$

При описании детали не всегда можно определить ее в виде ограничивающей поверхности одного типа (например, сферической, цилиндрической и т. д.). Поэтому, определив ряд элементарных типовых поверхностей, из совокупности последних можно синтезировать с необходимой степенью точности пространственный образ объекта. Это означает, что МКМ детали в общем случае представляет собой набор элементарных координатных моделей (ЭКМ) различных типов, жестко связанных между собой. Для описания формы и расположения в пространстве каждой ЭКМ необходимо задать шесть функционально независимых параметров: трех, описывающих координаты начала отсчета собственной системы координат ЭКМ относительно базовой; трех, описывающих форму элементарной координатной модели.

К основным относятся три типа ЭКМ: параллелепипед (ЭКМП), цилиндр (ЭКМЦ), сфера (ЭКМС). Варьируя параметрами формы, можно получить некоторые производные от этих типов ЭКМ, которые позволяют более точно описывать реальные объекты.

*Параллелепипед* (рис. 9.10, а):

параметры, характеризующие начало отсчета собственной системы координат,

$$X_{ij} = X, \quad Y_{ij} = Y, \quad Z_{ij} = Z;$$

параметры, описывающие форму ЭКМ,

$$x_{ij} = x, \quad y_{ij} = y, \quad z_{ij} = z,$$

где индекс  $i$  означает номер детали сборочной единицы;  $j$  — номер ЭКМ детали.

*Цилиндр* (рис. 9.10, б):

параметры начала отсчета собственной системы координат

$$X_{ij} = X; \quad Y_{ij} = Y; \quad Z_{ij} = Z.$$

Для параметров, описывающих форму ЭКМ, применяется цилиндрическая система координат  $\rho, \varphi, h$ . Используя связь между декартовой и цилиндрической системами координат при условии, что начала координат

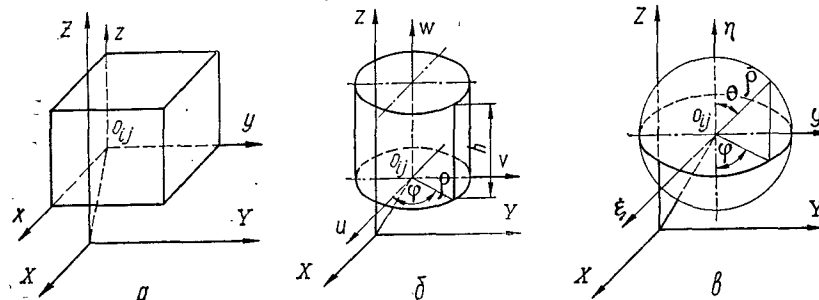


Рис. 9.10. Типы ЭКМ:

а — параллелепипед; б — цилиндр; в — сфера

динат систем совпадают и главная прямая цилиндрической системы координат совпадает с осью  $Z$  декартовой, получаем зависимости

$$x = \rho \cos \varphi; \quad y = \rho \sin \varphi; \quad z = h. \quad (9.2)$$

Уравнения (9.2) характеризуют цилиндрическую поверхность в декартовой системе координат  $(X, Y, Z)$ . Следовательно, параметры формы ЭКМЦ имеют вид

$$x_{ij} = x; \quad y_{ij} = y; \quad z_{ij} = z.$$

*Сфера* (рис. 9.10, в):

параметры, характеризующие начало отсчета собственной системы координат,

$$X_{ij} = X; \quad Y_{ij} = Y; \quad Z_{ij} = Z;$$

параметры, описывающие форму ЭКМС в сферической системе координат  $\bar{\rho}, \varphi, \theta$ . Используя зависимость между декартовой и сферической системами координат, получаем

$$x = \bar{\rho} \cos \varphi \sin \theta; \quad y = \bar{\rho} \sin \varphi \sin \theta; \quad z = \bar{\rho} \cos \theta. \quad (9.3)$$

Уравнения (9.3) описывают сферическую поверхность ЭКМС в декартовой системе координат  $(X, Y, Z)$ . Следовательно, параметры формы ЭКМС имеют вид

$$x_{ij} = x; \quad y_{ij} = y; \quad z_{ij} = z.$$

Таким образом, из совокупности ЭКМ получаем координатную модель детали, выраженную через описание ее поверхности в декартовой системе координат.

Пусть необходимо построить координатную модель детали (рис. 9.11). В начале выбираем базовую систему координат так, чтобы деталь находилась в I октанте, т. е. чтобы  $X_{ij} \geq 0$ ;  $Y_{ij} \geq 0$ ;  $Z_{ij} \geq 0$ .

Оси собственных систем координат ЭКМ должны быть параллельны соответствующим осям базовой системы. Если это условие выполнимо не для всех ЭКМ, необходимо, используя формулы поворота декартовой системы координат вокруг проходящей через начало координат оси с известными направляющими косинусами

$$\begin{aligned} X' &= l_1 X + m_1 Y + n_1 Z; \\ Y' &= l_2 X + m_2 Y + n_2 Z; \\ Z' &= l_3 X + m_3 Y + n_3 Z \end{aligned}$$

или в векторной форме  $X' = XA$ , где

$$X' = (X', Y', Z');$$

$$X = (X, Y, Z);$$

$$A = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix},$$

привести в соответствие систему координат ЭКМ базовой системе координат. Выбираем одну или несколько ЭКМ так, чтобы деталь находилась внутри координатной модели.

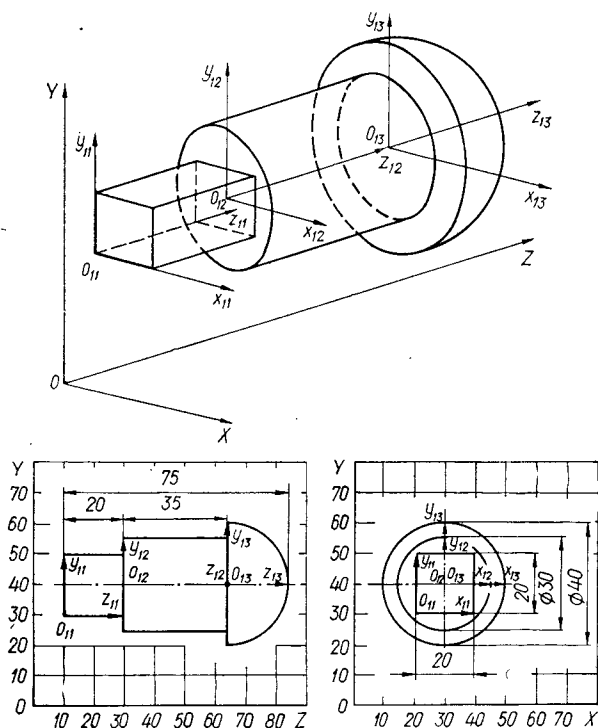


Рис. 9.11. Пример описания детали

При анализе сборочной единицы (определение возможных вариантов сборки) необходимо наиболее точно описывать те поверхности, которые непосредственно соприкасаются в узле, а также поверхности, предполагаемые для захвата детали промышленным роботом при автоматической сборке.

Деталь, изображенную на рис. 9.11, можно описать с помощью трех ЭКМ.

1. ЭКМП с началом собственной системы координат в точке  $O_{11}$ :

параметры положения

$$X_{11} = 20, Y_{11} = 30, Z_{11} = 10;$$

параметры формы

$$x_{11} = 20, y_{11} = 20, z_{11} = 20.$$

2. ЭКМЦ с началом собственной системы координат в точке  $O_{12}$ :

параметры положения

$$X_{12} = 30, Y_{12} = 40, Z_{12} = 30;$$

параметры формы

$$\begin{aligned} x_{12} &= \rho \cos \varphi; \quad y_{12} = b_2 = 40; \\ z_{12} &= \rho \sin \varphi, \quad \rho = 15, \quad \varphi = 0 \dots 360^\circ. \end{aligned}$$

3. ЭКМС с началом собственной системы координат в точке  $O_{13}$ :  
параметры положения

$$X_{13} = 30, Y_{13} = 40, Z_{13} = 65;$$

параметры формы

$$\begin{aligned} x_{13} &= \bar{\rho} \cos \varphi \sin \theta, \quad y_{13} = \bar{\rho} \cos \theta, \quad z_{13} = \bar{\rho} \sin \theta \sin \varphi; \\ \bar{\rho} &= 20, \quad \varphi = 0 \dots 360^\circ, \quad \theta = 0 \dots 180^\circ. \end{aligned}$$

Используя рассмотренный метод, можно сформировать математическую координатную модель сборочного изделия, которая однозначно характеризует геометрическую форму деталей, а также их пространственное расположение в изделии относительно базовой системы координат  $X, Y, Z$ . Такой метод представления геометрической информации сочетает два основных подхода к описанию детали. Пространственный образ детали (на основании системно-структурного анализа) составляется из совокупности объемных элементов (в данном случае ЭКМ), которые описываются аналитически через уравнения поверхности в параметрической форме.

Для машинной обработки геометрической информации о сборочном изделии необходимо:

ввести в ЭВМ массивы, содержащие координаты начала отсчета собственных систем координат ЭКМ каждой детали,

$$U_{ij} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1j} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{i1} & U_{i2} & \dots & U_{ij} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} U &= [n, m], \\ U &= (X, Y, Z). \end{aligned}$$

где  $n$  — количество деталей,  $m$  — количество ЭКМ;

задать параметры формы в соответствии с типом ЭКМ для ЭКМП —  $x, y, z$ ; для ЭКМЦ —  $\rho, \varphi, h$ ; для ЭКМС —  $\bar{\rho}, \varphi, \theta$ .

После обработки соответствующих программ получаем массивы декартовых координат ЭКМ деталей:

$$u_{ij} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1j} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{i1} & u_{i2} & \dots & u_{ij} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} u &= [n, m], \\ u &= (x, y, z). \end{aligned}$$

Массивы  $U_{ij}$  и  $u_{ij}$  служат исходной информацией для программ технологического проектирования.

## 7. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СБОРКИ

При разработке принципиальной схемы сборки необходимо прежде проанализировать варианты последовательности установки элементов узла с учетом ограничений доступа и базирования [50]. Последовательность установки всецело определяет структуру всего технологического процесса, который включает подготовительные операции (чистка, промывка, комплектование), непосредственно сборочные (поштучное

отделение, ориентирование, подача в зону сборки, сопряжение, соединение) и послесборочные (контроль, испытание, герметизация, упаковка). Для анализа изделия с целью определения возможных маршрутов его сборки используется метод аналитического описания формы и взаимного расположения деталей узла, рассмотренный в параграфе 6. Далее переходят непосредственно к анализу маршрутов (последовательности) сборки.

Пусть сборочное изделие  $A$  состоит из  $n$  элементов:  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Последовательность установки элементов этого изделия представляется как упорядоченный набор  $a_n \in A$ , удовлетворяющий условиям доступа и условиям базирования элементов. Условия доступа определяют возможность установки элемента  $a_{i+1}$  на свое место в узле после установки  $a_i$ -го элемента, а также установки детали с учетом наложенных связей при захвате ее ПР в случае роботизированной сборки. Условия базирования определяют возможность базирования  $a_{i+1}$ -й

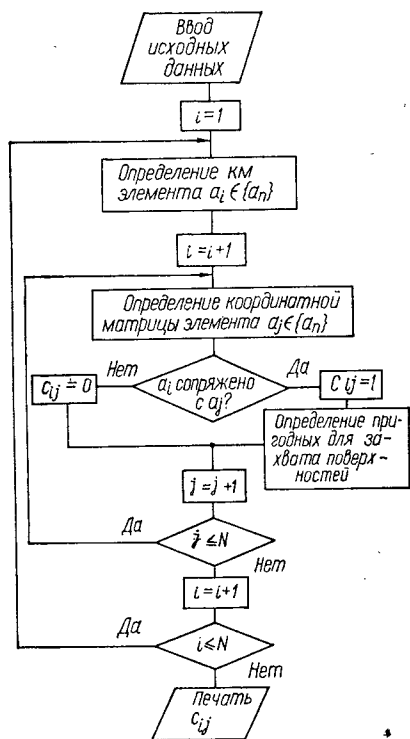


Рис. 9.12. Схема алгоритма определения матрицы механических связей

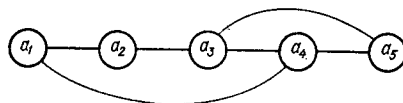


Рис. 9.13. Граф механических связей изделия

детали на  $a_i$ -ю при обеспечении точности базирования и технологических требований.

Начальным этапом определения последовательности установки элементов сборочного узла является формирование пространственного геометрического образа каждой детали и узла в целом. Для этого, анализируя чертеж узла, необходимо описать детали соответствующим типом ЭКМ (или набором типов ЭКМ) и задать координаты начала отсчета собственных систем координат ЭКМ —  $X, Y, Z$ , а также параметры формы для каждой ЭКМ (см. параграф 6). Далее, согласно алгоритму (рис. 9.12), определяется матрица механических связей  $c_{ij}$  деталей сборочного узла:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я деталь сопряжена с } j\text{-й;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При проверке условий сопряжения, в случае наличия механических связей между  $i$ -й и  $j$ -й деталями, необходимо определить поверхности, свободные от сопряжения и, следовательно, пригодные для наложения связей по захватыванию детали ПР. Это особенно важно, когда ПР непосредственно осуществляет сборку.

Граф механических связей элементов сборочного узла  $G$  является исходной информацией при определении последовательности установки деталей. Анализ графа  $G$  (или матрицы  $a_{ij}$ ) осуществляется с помощью модифицированного метода поиска в глубину на неориентированном графе.

Суть метода заключается в следующем. Выбирается и «окрашивается» некоторая начальная вершина  $a_1$  графа. Затем, используя процедуру Поиск, определяются ребра, инцидентные вершине  $a_1$ , а также вершинам  $a_i$  ( $i = 2, k$ ), принадлежащим этим ребрам. Каждая из вершин может быть «окрашена» после  $a_1$  (т. е. второй — вершина  $a_2$  и т. д.).

Таким образом, если в результате работы процедуры Поиск ( $a_1$ ) выявлено  $k$  вершин, то число последовательностей «окрашивания» этих вершин равно  $k$ . Определение вышеупомянутых последовательностей выполняет процедура Перестановка ( $a_i, i = 2, k$ ).

Пусть вершина  $a_k$  — последняя «окрашенная» вершина. Для продолжения процесса вызываем процедуру Поиск ( $a_k$ ), и дальнейшее «окрашивание» происходит аналогично. На этом шаге «окрашенными» ранее вершины не рассматриваются. Если на каком-либо этапе окажутся «окрашенными» все вершины, граф возвращается на предыдущий этап, выбирается очередная последовательность и снова происходит поиск.

Для более четкого понимания сути этого метода рассмотрим его применение при анализе изделия, описываемого графом (рис. 9.13). Вначале все вершины помечены как «неокрашенные». Допустим, выбирается и «окрашивается» вершина  $a_1$  как начальная. Выполняя процедуру Поиск ( $a_1$ ), находим вершины  $a_2$  и  $a_4$ . Процедура Перестановка позволит получить пару сочетаний:  $(a_2, a_4)$  и  $(a_1, a_2)$ . Выбираем первую и «окрашиваем» вершины  $a_2$  и  $a_4$ . Процедура Поиск ( $a_4$ ) как вершины, последней из «окрашенных», выявит новую пару вершин  $a_3$  и  $a_5$ . Используя процедуру Перестановка, определяем пару сочетаний:  $(a_3, a_5)$  и  $(a_5, a_3)$ . Выбираем первую перестановку  $(a_3, a_2)$  и «окрасим», эти вершины. Так как все вершины графа оказались «окрашенными», выбираем вторую перестановку  $(a_5, a_3)$  и «окрашиваем» эти вершины. Вновь все вершины графа оказываются «окрашенными», поэтому возвращаемся на предыдущий этап и выбираем вторую перестановку  $(a_4, a_2)$ , у которой последней из «окрашенных» оказывается вершина  $a_2$ . Процедура Поиск ( $a_2$ ) определяет вершину  $a_3$ , которая после «окраски» и процедуры Поиск ( $a_3$ ) выявит вершину  $a_5$ . Ее «окрашиванием» и закончится работа модифицированного метода поиска вглубь. Таким образом оказались определенными три последовательности установки деталей при сборке: 1)  $a_1-a_2-a_4-a_3-a_5$ ; 2)  $a_1-a_2-a_4-a_5-a_3$ ; 3)  $a_1-a_4-a_2-a_3-a_5$ .

Проверяя возможность включения каждого элемента в последовательность по условиям доступа и базирования, можно определить ряд реализуемых последовательностей установки деталей в процессе сборки.

## 8. ОРГАНИЗАЦИЯ ДИАЛОГА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Этап проектирования РТК, связанный с анализом технологичности объекта роботизации (изделия, комплектующих его элементов, технологических процессов и т. д.), может иметь самостоятельное значение и выполнять роль подсистемы «Советчик конструктора». Действительно, если объект роботизации оказывается нетехнологичным по ряду признаков, подсистема поиска технических средств не может выбрать состав и структуру РТК из-за отсутствия типовых средств и методов обслуживания объекта. Тогда конструктору посылается запрос на изменение конструкции изделия (или его составляющих) а технолог — на изменение маршрута технологического процесса с тем, чтобы повысить количественную оценку технологичности объекта роботизации. При этом необходима организация обращения проектировщика к ЭВМ с целью итерационного приближения конструкции изделий и их компонентов, а также структуры сборочного срединения (в случае проектирования сборочных РТК) и маршрута изготовления объекта роботизации к тем характеристикам, для которых САПР может выдать типовое решение. Поэтому создание современных САПР основано на использовании режима диалога [54]. При этом право выбора тех или иных решений в наиболее сложных неформальных ситуациях остается за человеком.

Получая доступ к ЭВМ и располагая различными средствами визуального контроля, конструктор и технолог могут вмешиваться на любом этапе в процесс проектирования РТК, используя свой опыт и интуицию. Применение режима диалога позволяет повысить качество проектируемых роботизированных технологий и расширить сферу использования ЭВМ как по способам, так и по средствам производства, которые в них используются, но недостаточно отражены в банках данных информационно-поисковых систем. Происходит и обратный процесс: воздействие САПР на разработчиков изделий для создания ими таких конструкторских и технологических решений, которые обеспечиваются ограниченной номенклатурой типовых переналаживаемых средств автоматизации, в результате чего при создании РТК могли бы использоваться методы агрегатирования из унифицированных элементов.

Режим диалога используется в основном при автоматизированном проектировании роботизированных технологий, имеющих сложные маршруты изготовления изделий при многовариантном характере маршрутизации. В этих случаях использование диалоговой системы обеспечивает следующие возможности:

человек может вмешиваться в процесс проектирования и подыскивать необходимое решение, в частности, при выборе структуры технологического процесса и отдельных операций, а также при выборе

состава и структуры РТК. В этом случае человек либо контролирует и исправляет (дополняет) варианты, которые ему предлагает ЭВМ при наличии в системе соответствующих алгоритмов, либо вносит свой вариант при запросе машины;

при наличии равноценных результатов выбор окончательного варианта остается за человеком, который руководствуется оперативной производственной обстановкой, не учитываемой машиной. Кроме того, при варьировании человеком исходных данных и параметров объектов роботизации осуществляется направленный выбор оптимального процесса, так как можно варьировать конструктивными особенностями изделий и их компонентов, изменять начальные условия в пределах, допускаемых производственной обстановкой, возможностями комплектации РТК разным составом оборудования и технологической оснастки и т. д.;

осуществления контроля за процессом проектирования и принятием решений и оперативного устранения возникающих ошибок по результатам вывода промежуточных данных и результатов. Такой режим работы позволяет существенно сократить количество итераций, а следовательно, и время на проектирование РТК.

В качестве средств оперативного отображения информации используются текстовые и графические дисплеи. Вывод информации на экран дисплея и ввод информации с визуальным контролем существенно повышают оперативность системы. Диалог может проводиться

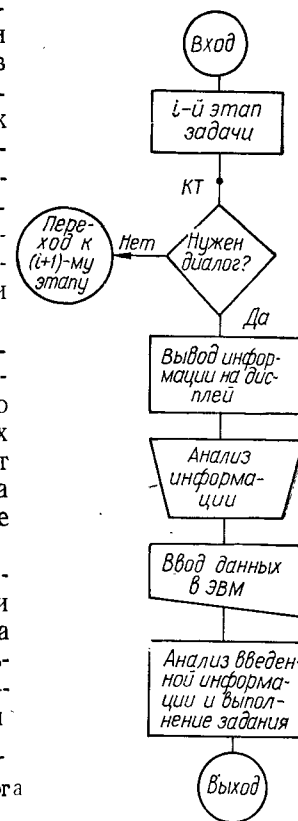


Рис. 9.14. Функциональная схема проведения диалога (КТ — контрольная точка)

с помощью дисплеев, входящих в состав как абонентских пунктов ЕС ЭВМ, так и автоматизированного рабочего места (АРМ), состыкованного с ЕС ЭВМ. В ряде случаев, не требующих быстрого принятия решений, диалог может осуществляться с помощью пультовой пишущей машинки. При большом объеме промежуточной информации последняя может выводиться на алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ).

Комплекс программных средств диалоговой системы включает управляющую программу, программу анализа ответов и программу обмена информацией со средствами ее оперативного отображения.

Функционирование диалоговой системы основано на прерывании процесса проектирования в так называемых «контрольных точках» программы и выводе информации на оперативные средства отображе-

ния (рис. 9.14). После анализа этой информации оператором (конструктором или технологом) и ввода своей информации процесс проектирования продолжается до новой «контрольной точки» и так до тех пор, пока задача не будет решена. Для этого процесс проектирования заранее разбивают на функционально законченные этапы и для каждого из них определяют, в какой форме и каком объеме должна выводиться информация. Функциональная схема проведения диалога предполагает вывод следующей информации из ЭВМ: варианта решения; промежуточной; требования на ввод недостающей информации.

*Вывод варианта решения* осуществляется при необходимости уточнения конструктором или технологом некоторых условий, обеспечивающих выполнение задания на проектирование, в частности, использовать для накопления объектов роботизации сотовых или шахтных накопителей (например, для малогабаритных плоских деталей). После анализа выведенных вариантов решений оператор вводится в ЭВМ указание на то, какой вариант необходимо выбрать в качестве исходного с учетом производственных возможностей.

При *выводе промежуточной информации* разработчик информирует о правильности функционирования системы проектирования. При этом процесс проектирования может корректироваться. Например, может выводиться массив с перечнем переходов проектируемого процесса. Корректировка может заключаться в удалении некоторых элементов (переходов) маршрута техпроцесса и в их перестановках, диктуемых условиями оптимальной структуры и состава РТК.

*Требование на ввод недостающей информации* обычно связано с недостатком данных, требующихся для решения конкретной технологической задачи. При этом необходимые данные могут отсутствовать либо во входной, либо в нормативно-справочной информации. Например, ЭВМ может выдать задание на ввод данных по уточнению механических свойств захватываемых деталей, что является необходимым для определения условий наложения удерживающих и избыточных связей на деталь при ее обслуживании ПР, а следовательно, для выбора (проектирования) его ЗУ. (В этом случае имеется в виду ошибка в исходных данных).

Таким образом, последовательность действий человека во всех указанных случаях вывода информации жесткая и инициируется машиной, что ограничивает участие человека в коррекции проектных процедур. Можно расширить это участие, если предусмотреть «параллельный» просчет вариантов, когда конструктор или технолог может прервать признанный неудовлетворительным вариант и перейти к новому, и т. д. Если же так и не удастся обеспечить лучший вариант, то оператор должен иметь возможность обратиться к любой контрольной точке для продолжения прерванных ранее по первоначальному варианту действий. Для этого предусматривается запоминание промежуточных вариантов проектирования. Действия в этом случае уже «навязываются» человеком, т. е. задания на выполнение действий могут поступать как от ЭВМ, так и от человека. Такие диалоговые системы называются смешанными.

Из вышеизложенного следует, что возможно создание системы проектирования, содержащей задачи с разным уровнем автоматизации их решения. Такие системы позволяют реализовать принцип их последовательного развития и адаптации к окружающим условиям. По мере совершенствования и развития САПР отдельные программные модули заменяются более совершенными, дополняются новыми модулями, автоматизирующими ручные операции. Происходит постепенное объединение САПР с другими автоматизированными системами (например, технологической подготовки производства), в результате чего создаются интегрированные системы управления производством, в которых комплекс программ для ведения диалога становится все более важной частью общего математического обеспечения.

## Глава X

### ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 1. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**О**собенности применения роботов в механообработке. В механообрабатывающем производстве ПР используются главным образом для межстаночного транспортирования, установки — снятия деталей, погрузочно-разгрузочных работ и различных вспомогательных операций. Наиболее эффективно применение ПР для обслуживания металлорежущего оборудования с ЧПУ, при этом роботы целесообразно стыковать с общей системой ЧПУ, минуя индивидуальные пульта управления. Чтобы сократить вспомогательное время на установку (и снятие) заготовки на станки с ЧПУ, используются двуручные или двухзахватные роботы.

Для выполнения транспортных и погрузочных операций при механообработке ПР применяются в тех случаях, когда величина партий обрабатываемых деталей относительно велика (от сотен штук и более) а номенклатура ограничена несколькими десятками наименований.

В *мелкосерийном* и *индивидуальном* производствах применение ПР ограничено большим разнообразием форм и размеров обрабатываемых деталей, их широкой номенклатурой и частой сменяемостью. В связи с этим требуется создание роботов, обладающих очень широкими технологическими и функциональными возможностями.

В *массовом* и *крупносерийном* производствах ПР находят наибольшее применение при создании гибких автоматических переналаживаемых систем для выполнения операций загрузки оборудования и транспортирования деталей на начальных и конечных позициях таких систем, а также при обслуживании процессов складирования готовой продукции. Особенно перспективны ПР при обслуживании агрегатных

станков типа «обрабатывающий центр», организованных по три-четыре в автоматизированные технологические ячейки. Наиболее эффективная сфера применения ПР в механообрабатывающем производстве — *серийное производство* на станках с ЧПУ при обработке деталей массой от 20 до 500 кг.

В целом роботизация технологических процессов обработки деталей на металлорежущих станках обусловлена следующими основными особенностями этих процессов:

относительно большое машинное время, обеспечивающее возможность роботу для многостаночного обслуживания. Оптимальные усло-

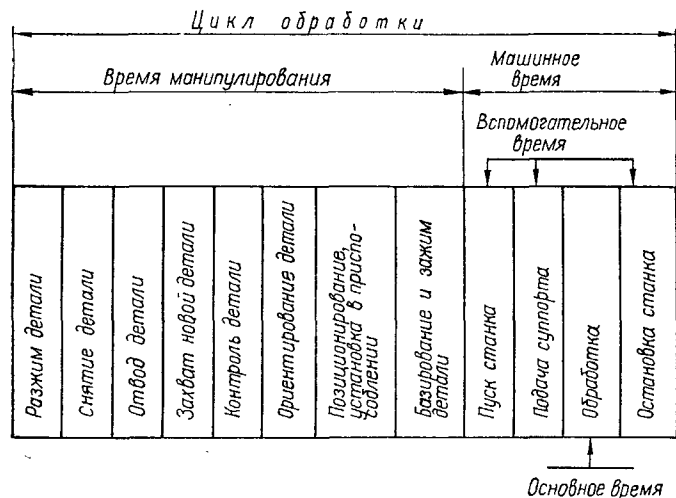


Рис. 10.1. Схема составляющих цикла обработки

вия взаимодействия элементов РТК обеспечиваются при совмещении отдельных составляющих времени манипулирования с составляющими машинного времени (рис. 10.1);

большая протяженность технологических потоков, требующая выполнения транспортных операций деталей значительной массы в случае их обработки на станках с ЧПУ;

наличие станочной оснастки, позволяющей устанавливать детали с минимальными зазорами;

наличие большой и быстросменяемой номенклатуры вспомогательного технологического оборудования и оснастки;

наличие многообразных контрольных операций, которые могут быть легко совмещены с процессами разгрузки технологического оборудования ПР;

значительная унификация и специализация механообрабатывающих операций.

В общем случае при построении РТК по обслуживанию процессов обработки деталей на металлообрабатывающем оборудовании необходимо исходить из данных, приведенных в гл. II.

Состав оборудования, входящего в РТК по обслуживанию процессов механообработки деталей на металлорежущих станках, по номенклатуре мало отличается от РТК другого назначения, типовый состав которого приведен в гл. II.

Одним из основных этапов технологической подготовки внедрения ПР в механообрабатывающее серийное и мелкосерийное производства является анализ производства, который базируется на конструкторской, технологической и производственной классификации обрабатываемых деталей, унификации технологических процессов и оснастки, внутризаводской специализации (включая группирование деталей изделий и специализацию рабочих мест), организации многопредметных поточных линий, механизации и автоматизации транспортно-складских работ.

При роботизации действующего технологического процесса обработки деталей для каждого вида производства (массовое, крупносерийное, серийное, мелкосерийное и индивидуальное) на этапе анализа устанавливают основные виды технологических процессов (индивидуальные, групповые, типовые), организационные методы производства (поточные, непоточные, одно- и многопредметные), форму внутризаводской специализации (предметная, технологическая, поддетальная), характер движения детали по технологическому процессу (прерывный, непрерывный), особенности технологического оснащения (с переналадкой, без переналадки).

Наиболее успешно внедряются роботы первого поколения в упорядоченные производственные потоки, в частности, в однопредметные непрерывно-поточные линии.

Одна из существенных для роботизации особенностей механической обработки деталей заключается в многооперационности и многопереходности технологического процесса, во время которого деталь непрерывно меняет геометрическое положение в пространстве и форму (габариты, масса, конфигурация). Поэтому при анализе производства для определения целесообразности и возможности внедрения ПР особое внимание уделяется изучению кинематики движения и формообразованию детали, в значительной мере предопределяющих основные параметры ПР, на базе которого строится РТК\*.

К основным (объективным и стабильным) классификационным признакам деталей относится геометрическая форма. Второстепенными признаками могут быть конструктивные характеристики отдельных элементов детали, их взаимное расположение, функциональное назначение, параметрические признаки и др.

В основу планировки РТК должен быть положен принцип объединения оборудования по групповому признаку, прямоотности и непрерывности технологического процесса.

Методы групповой технологии позволяют в серийном производстве обрабатывать детали укрупненными партиями при условии их технологической однотипности без существенной переналадки элементов РТК. Станки в этом случае устанавливаются в порядке последова-

\* Подробно процесс подготовки базы данных по деталям рассмотрен в гл. II.

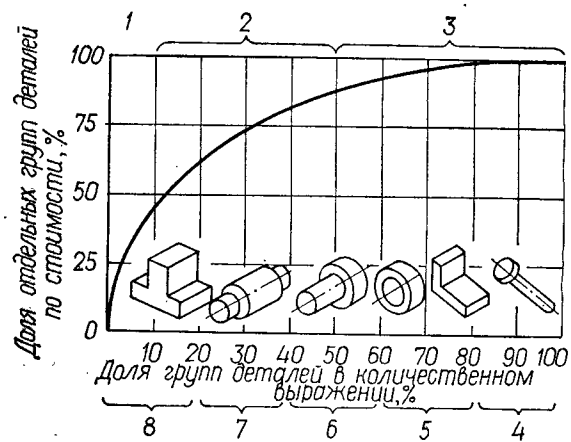
тельности выполняемых операций, благодаря чему существенно повышается серийность производства и увеличивается количество однотипных деталей в группе. Это создает предпосылки и для использования однотипных ПР, обслуживающих процессы с групповой технологией. Вместе с тем снижаются эксплуатационные затраты на обслуживание однотипного оборудования.

Создание на производстве предметных участков, на которых комплексно обрабатываются конкретные группы деталей, позволяет обоснованно выбирать наиболее рациональные и типовые технологические решения. На рис. 10.2 изображен график, характеризующий необходимость выбора конкретных технологических решений в зависимости от группы объектов [84].

Из графика следует, что наиболее сложные

Рис. 10.2. Зависимость технологических решений от группы объектов:

1 — основные крупногабаритные детали; 2 — средние детали; 3 — мелкие детали; 4 — целесообразность изготовления на специализированных автоматах; 5 — изготовление на универсальных автоматах; 6 — изготовление на поточных линиях без транспортных устройств; 7 — изготовление деталей на станках с ЧПУ; 8 — использование многоцелевых станков (типа «обрабатывающий центр») с ЧПУ



детали составляют в количественном отношении только 10 %, а по стоимости — 50 % от общего количества; 40 % деталей относятся к группе средних и по своей стоимости составляют 30 %; все остальные детали (50 %) — мелкие и по своей стоимости составляют всего 20 % от общего количества.

По мере широкого внедрения методов групповой технологии величины партий однотипных деталей увеличиваются, создаются условия для автоматизации отдельных процессов на базе создания гибких производственных систем и предпосылки для использования ПР, так как осуществляется перевод индивидуального и мелкосерийного производства в серийное и крупносерийное.

В основе построения РТК в действующих производствах лежит оценка типовых схем расположения металлорежущего оборудования в цехах машиностроительных предприятий [31], причем наиболее рациональными являются схемы, изображенные на рис. 10.3.

Основными признаками таких компоновок являются:

обслуживание автономным или встроенным роботом одной единицы станочного оборудования (массовое и крупносерийное производство) (рис. 10.3, а);

обслуживание одним автономным роботом группы из двух—четырех станков (при последовательном цикле обработки) (рис. 10.3, б);

несколько автономных роботов обслуживают группу станков, число которых превышает количество первых (несколько вариантов обработки с разной последовательностью операций) (рис. 10.3, в).

Целесообразность организации РТК на участке станков с ЧПУ устанавливается с учетом следующих факторов, определяющих специфику построения участка: технологический маршрут обрабатываемых объектов и состав операций; подготовку баз (разметку и т. п.)

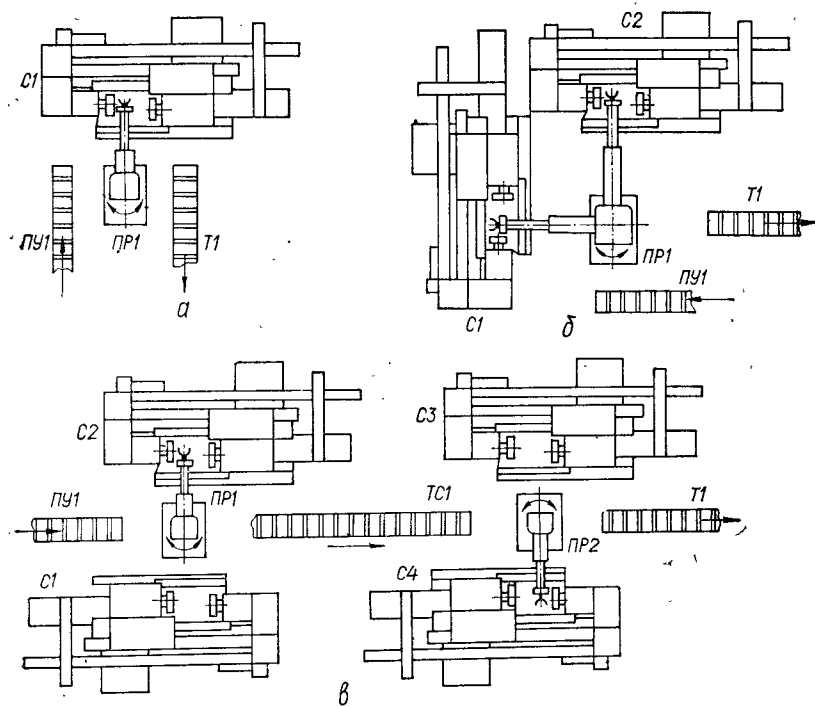


Рис. 10.3. Схема компоновки РТК:

ПУ1 — подающее устройство; С1 ... С4 — станочное оборудование; ПР1 ... ПР2 — промышленные роботы; ТС1 — транспортная система; Т1 — тара (отводящее устройство)

установку предметов в оснастку с ручной выверкой; слесарные операции на рабочих местах; контроль универсальным измерительным инструментом; состав оборудования (степень автоматизации рабочих циклов и механизации станочных приспособлений); расположение основного и вспомогательного оборудования и т. д.

Применение промышленных роботов на операциях горячей штамповки. Условия труда рабочих, участвующих в выполнении процесса горячей штамповки, характеризуются повышенной опасностью и вредностью из-за высокой температуры, запыленности и загазованности среды, больших физических нагрузок и высокого уровня производственных шумов. Комплексная автоматизация с применением ПР в кузнечно-штамповочном производстве представляет собой качественно новую

технико-организационную форму производства, сопровождающуюся совершенствованием кузнечного оборудования, технологических процессов, нагревательных устройств, планирования и организации производства, а также улучшением условий и культуры труда.

При роботизации процессов горячей штамповки предпочтение следует отдавать заготовкам круглой формы, не требующим дополнительной ориентации на операциях резки, нагрева под штамповку и выдачи на позицию штамповки, что существенно сокращает временные и трудовые затраты на обслуживание этих процессов. К общим требованиям относятся ограничение угла среза торцов заготовок до 2°, исключение на их поверхностях трещин и расслоений, ограничение величины заусенца после разделки не более 1 мм.

В состав РТК для процессов кузнечно-штамповочного производства входят устройства для нагрева заготовок до температуры штамповки, оборудование для выполнения формоизменяющих и разделительных операций, ПР и вспомогательные устройства: загрузки заготовок в нагреватель; передачи и ориентирования заготовок и поковок; подачи; смазочно-охлаждающей жидкости; крепления и перемещения роботов захватные; удаления поковок и отходов; управления комплексом; для замены тары и тара. Компоновка РТК должна обеспечивать реализацию основного преимущества автоматизации технологических процессов горячей объемной штамповки с использованием ПР — возможность создания гибких многономенклатурных линий.

Для сокращения времени цикла обработки целесообразно использовать компоновки, в которых заготовки на первую позицию подаются со стороны расположения робота, что позволяет совместить операции захвата заготовки в ориентирующем устройстве с рабочим ходом прессы. При этом компоновка должна обеспечивать захват поковки сразу после рабочего хода прессы, особенно для случая обработки асимметричных поковок, которые после выталкивания могут потерять ориентированное положение. Кроме того, при одновременной обработке заготовки на всех технологических позициях количество рук и ЗУ обслуживающих роботов должно быть на единицу больше числа зон обработки. При этом ЗУ должны обеспечивать: надежный зажим и удержание заготовки при ее транспортировании с исходной позиции выдачи в ориентированном положении на пресс до первой позиции формообразования и далее при передаче полуфабрикатов по позициям штамповки и удалении поковки с прессы в тару; надежность работы в условиях попадания окалины и технологической смазки при температурах заготовок до 1300 °С; минимальное время на зажим и разжим ЗУ без потери ориентации заготовок.

Наибольшее распространение получили механические рычажные ЗУ (см. гл. VI).

Применение промышленных роботов на операциях холодной штамповки. В настоящее время около 25—30 % всех ПР используются на операциях холодной штамповки. Применение ПР в штамповочном производстве позволяет решить проблему полной автоматизации штамповки деталей из листовых заготовок как в массовом, так и в серийном производстве. ПР целесообразно использовать при автоматизации

и механизации следующих вспомогательных операций листоштамповочного производства: подачи листа для резки, складирование полос и карт, транспортирование накопителей заготовок к прессам, загрузка-разгрузка штампа, межштамповые и межстаночные перемещения штамповок, складирование штамповок и отходов.

Область рационального применения существующих моделей ПР зависит от типов производства и прессы, количества закрепленных за прессом операций, годового выпуска деталей (табл. 10.1), а также от количества переналадок РТК в смену (определяется годовой программой выпуска) и количества запусков деталей в изготовление.

10.1. Области рационального применения ПР на операциях листоштамповочного производства

Факторы	Тип производства				
	массовое	крупносерийное	серийное	мелко-серийное	единичное
Уровень механизации и автоматизации	Специальные автоматические линии	Переналаживаемые автоматические линии и РТК	Переналаживаемые поточные линии и РТК	Универсальные средства механизации и РТК	Универсальные средства механизации
Тип прессового оборудования	Специальные быстроходные прессы и прессы-автоматы	Быстроходные универсальные прессы и прессы-автоматы	Универсальные прессы	Универсальные и специализированные прессы	Универсальные и специализированные прессы
Количество закрепленных за единицей оборудования операций (коэффициент серийности)	1 — 3	До 5	От 5 до 60	Свыше 60	
Годовой выпуск деталей, тыс. шт.:					
крупных	100	Свыше 60	От 10 до 60	Менее 10	Единицы
средних	250	Свыше 150	От 20 до 150	Менее 20	Десятки
мелких	500	Свыше 300	От 40 до 300	Менее 40	Сотни

При разработке РТК для мелкосерийного и серийного листоштамповочного производства ПР должны быть оснащены сменными захватными устройствами и загрузочными устройствами различного назначения. Поэтому необходимость типизации технологических процессов и унификации оборудования и оснастки для РТК приобретает особую актуальность.

Таким образом, выделяют основные направления развития промышленной робототехники в листовой штамповке; разработка унифициро-

ванных РТК и организация специализированного производства по выпуску таких комплексов; снижение себестоимости и совершенствование потребительских качеств ПР и РТК; применение средств АСУТП для контроля и управления РТК и группового управления ПР.

Основу технологической подготовки составляют выбор и группирование объектов роботизации (деталей, оборудования и процессов). При выборе деталей, переводящихся на штамповку с использованием РТК, предпочтительны плоские и пространственные штучные заготовки правильной геометрической формы, получаемые вырубкой в штампах и резкой на гильотинных ножницах. При этом наиболее предпочтительными являются габариты заготовок, не превышающие  $600 \times 600$  мм.

С точки зрения производительности РТК наилучшие условия создаются штампами с провалом детали через отверстие матрицы, а также штампами с приспособлениями для автоматического удаления из зоны штамповки. В этом случае за время выполнения штампом двойного хода и удаления заготовки ПР подготавливает к загрузке следующую заготовку.

В тех случаях, когда деталь формируется за две и более штамповочных операции без вспомогательных переходов между ними, наилучшие условия для работы ПР создаются штампами с выталкиванием детали на поверхность матрицы и передачей ее на последующую обработку манипуляционной системой робота. При этом выталкивание должно производиться плавно, без рывков и толчков, чтобы не нарушить ориентированное положение детали на поверхности матрицы. Особые трудности с внедрением ПР возникают при обслуживании операций вытяжки и формовки, так как при этом не всегда можно обеспечить условия плавного выталкивания детали, и ее ориентированное в процессе операции положение нарушается. В совмещенных штампах для этой цели необходимо одновременно использовать не только выталкиватели, но и съемники.

Затруднения с организацией плавного съема деталей после операции штамповки возникают, как правило, в связи с нарушениями требований к конструкциям штампов, которые должны обеспечивать: четкую фиксацию ловителями штампа подаваемой роботом заготовки; сохранение ориентированного положения заготовки при выталкивании и съеме; исключение возможности застревания заготовки как в верхней, так и в нижней частях штампа; возможность свободного входа и выхода руки робота в зону штамповки с заготовкой и без нее, в связи с чем расстояние  $t_{шт}$  между зеркалом матрицы и верхней частью штампа должно соответствовать значению  $t_{шт} \geq t_d + 1,3t_z$  (здесь  $t_d$  — высота детали;  $t_z$  — высота ЗУ робота); заднее расположение направляющих колонок с целью сокращения времени цикла штамповки.

Номенклатура входящих в состав РТК функциональных устройств мало отличается от типовой номенклатуры элементов РТК, в частности, для горячей штамповки.

Структура РТК на операциях холодной листовой штамповки может быть представлена схемами, рассмотренными в гл. II. Схемы технологических планировок РТК для листоштамповочных операций, а также

организация робототехнических позиций и участков в значительной мере определяются модификацией используемых ПР, имеющих различные траектории движений рук при обслуживании прессового оборудования (рис. 10.4).

Так, для однорукого робота, обслуживающего одну единицу прессового оборудования (рис. 10.4, а), возможны следующие схемы траектории движений рук ПР.

Схема I. Рука робота выполняет загрузку заготовок в штамп Ш из подающего устройства ПУ, расположенного на одном уровне с горизонтальным участком ее траектории. Удаление отштампованной детали производится автоматическим сбрасывателем.

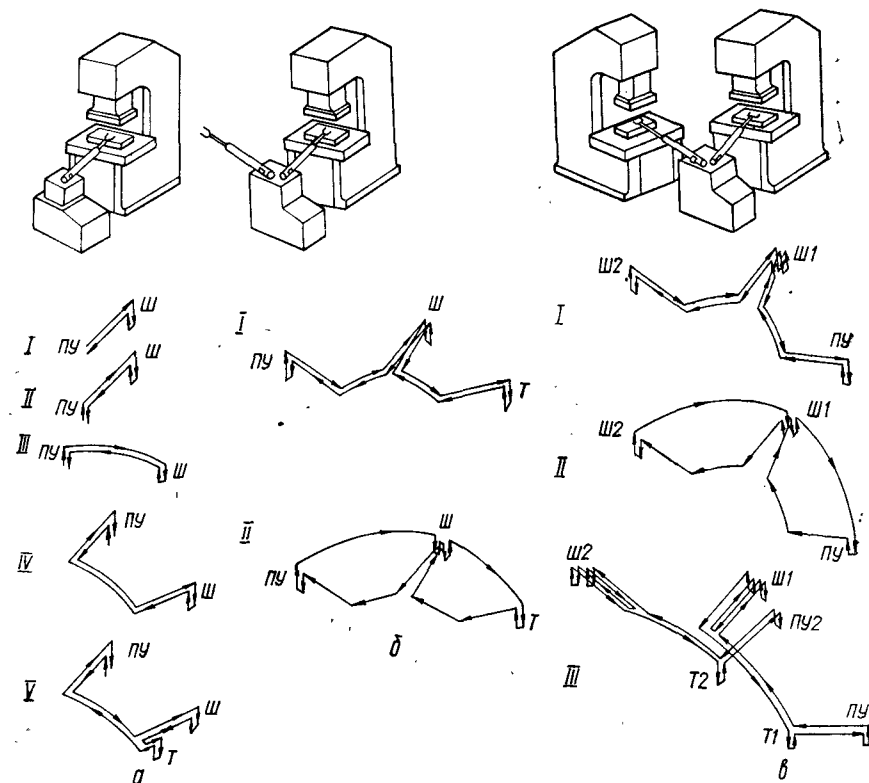


Рис. 10.4. Типовые траектории движений рук ПР при обслуживании прессового оборудования в случае однорукого (а) и двурукого (б) робота с одной единицей оборудования и двурукого робота с двумя единицами оборудования (в)

Схема II. Рука робота захватывает заготовку в крайнем нижнем положении траектории из подающего устройства ПУ и осуществляет транспортирование и установку заготовки в штамп Ш. При этом подающее устройство и штамп расположены на одной прямой — линии выдвижения руки робота. Удаление детали производится аналогично схеме I.

*Схема III.* При обслуживании штампа с задним расположением направляющих колонок возможно использование перемещения поворота руки робота. При этом подающее устройство ПУ и штамп Ш располагаются на отрезке дуги поворота руки ПР, который производит захват заготовки, ее транспортирование и укладку в штамп. Сброс отштампованной детали аналогичен схеме I.

*Схема IV.* Для штампов с передним или диагональным расположением направляющих колонок подающее устройство ПУ и штамп Ш разносятся от линии выдвижения руки робота на определенное расстояние, необходимое для обхода направляющих колонок штампа. В этом случае траектория движения руки робота обеспечивает захват заготовки из подающего устройства в крайнем нижнем положении захватного устройства, подъем ЗУ, транспортирование заготовки с учетом необходимости обхода направляющих колонок за счет радиального перемещения и вращения руки робота, затем снова радиальное перемещение и установку заготовки в штамп. Удаление детали осуществляется аналогично схеме I.

*Схема V.* Рука робота укладывает заготовку в штамп Ш и удаляет оттуда отштампованную деталь в тару Т, располагаемую в одной из крайних точек траектории руки при ее втянутом положении. Процесс обслуживания штампа заключается в захвате рукой робота заготовки из подающего устройства ПУ, транспортировании заготовки с учетом необходимости обхода направляющих колонок штампа и ее укладке в штамп. После штамповки рука повторно входит в штамповое пространство, захватывает отштампованную деталь и переносит ее к таре или приемному устройству. При этом возможно вертикальное перемещение ЗУ для установки детали в тару. В случае наличия отводящего устройства, дополнительного вертикального перемещения захватных устройств к позиции выгрузки (тара Т) не требуется. Следует учитывать, что реализация обслуживания прессового оборудования по схеме V обладает наименьшей производительностью.

При обслуживании пресса одним двуруким роботом значительно сокращается вспомогательное время в связи с возможностью совмещения отдельных переходов. Представляют интерес схемы траектории движений рук робота, изображенные на рис. 10.4, б.

*Схема I.* Подающее устройство ПУ и тара Т (отводящий конвейер или накопитель отштампованных деталей) равноудалены от пресса с противоположных от него сторон, вследствие чего движение рук робота связано. Кроме того, уровень расположения заготовок в подающем устройстве и деталей в таре обуславливают необходимость движения рук ПР в крайнее нижнее положение, а диагональное расположение направляющих колонок пресса — обходных дополнительных движений в радиальном направлении.

*Схема II.* При отсутствии или заднем расположении направляющих колонок загрузка и выгрузка пресса выполняются роботом без дополнительного радиального движения рук назад. Однако из-за необходимости выполнения рабочего хода пресса требуется освобождение штамповочного пространства, в связи с чем возврат в исходное положение рук робота после каждого цикла происходит за счет переме-

щения рук назад. Такая схема организации движений рабочих органов ПР является предпочтительной, так как сокращает количество рабочих движений робота при тех же функциях, что и в схеме I.

Двурукие роботы целесообразно использовать для обслуживания двух прессов (рис. 10.4, в) с последовательной технологией обработки заготовки. Возможна организация обслуживания с помощью одного двуручного робота двух прессов для однооперационной обработки двух различных заготовок. При этом используются следующие схемы траекторий рук ПР.

*Схема I.* При диагональном расположении направляющих колонок необходимы обходные движения для обслуживания прессов. При этом правая рука робота транспортирует заготовку из подающего устройства ПУ в штамп Ш1, а левая — осуществляет выгрузку штампа Ш1 и транспортирование заготовки в штамп Ш2 синхронно, используя радиальное движение рук робота назад. Удаление детали после операции на штампе Ш2 автоматическое.

В исходное положение руки возвращаются при дополнительном радиальном движении назад.

*Схема II.* Организация движения рук робота по такой схеме применяется при заднем расположении направляющих колонок пресса. При этом захват заготовки правой рукой робота из подающего устройства ПУ и ее транспортирование в рабочую зону первого штампа Ш1, а также синхронная разгрузка первого штампа Ш1 и транспортирование заготовки в штамп Ш2 левой рукой происходят при выдвинутых в радиальном направлении руках ПР. Выполнение рабочей операции обоими прессами требует освобождения рабочей зоны штампа от рук робота, в связи с чем последние возвращаются в исходное положение при их радиальном выдвижении и поворотном движении колонны ПР. Удаление детали со штампа Ш2 после операции автоматическое.

*Схема III.* Эта схема используется при одновременном обслуживании двух прессов, осуществляющих штамповку двух однооперационных деталей одного или различных наименований. В этом случае используются два подающих устройства ПУ1 и ПУ2, расположенных с одной стороны штампов Ш1 и Ш2 в секторе поворота колонны двуручного ПР таким образом, что расстояние между подающими устройствами и прессами одинаково. Последовательность транспортных движений рук робота следующая. Из исходного состояния, когда руки робота втянуты и находятся в крайнем правом положении, осуществляется подъем колонны и синхронное выдвижение рук. Затем руки опускаются и производится захват заготовок из подающих устройств ПУ1 и ПУ2, после чего руки поднимаются и перемещаются во второе радиальное (втянутое) положение. Поворотом колонны и последующим выдвижением рук происходит загрузка штампов Ш1 и Ш2. Руки вновь втягиваются во второе крайнее положение. После операции штамповки готовые детали выгружаются из штампов Ш1 и Ш2 и транспортируются в тару Т1 и Т2 (или приемные устройства), которые располагаются перед подающими устройствами на линии выдвижения рук робота.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПР

В отличие от обслуживающих роботов, используемых для выполнения вспомогательных операций загрузки-разгрузки технологического металлообрабатывающего оборудования, для исполнительных роботов, выполняющих непосредственно технологические операции, грузоподъемность не является основной характеристикой. Это связано с тем, что номенклатура рабочего инструмента, которым манипулируют такие роботы, строго регламентирована. Поэтому определяющим становится требование строгого выполнения последовательности и характера манипуляционных движений, от которых зависит решение технологической задачи. Одной из таких технологических задач является контактная точечная сварка. Она характеризуется двумя процессами: собственно сварки и вспомогательных операций по вводу клещей в рабочую зону, перемещении их от точки к точке и выводу из рабочей зоны, причем непосредственно время сварки занимает 15–25 % продолжительности всего цикла. Поэтому выполнение ПР процессов точечной контактной сварки мало отличается от многопозиционного обслуживания других технологических процессов, например, комплектации сборочного соединения или операции загрузки (разгрузки) сотовых кассет, где широко используются позиционные системы управления с дискретными линейными и поворотными приводами. Дальнейшее развитие роботов для контактной точечной сварки связано с разработкой систем управления полным циклом, включающим собственно сварку и вспомогательные операции.

Среди сфер применения исполнительных роботов к числу важнейших относится дуговая сварка плавящимися и неплавящимися электродами. При этом выделяют две задачи, решение которых позволяет использовать ПР в сварочном (дуговая сварка) производстве [51].

*Первая задача* — разработка манипулирующей системы ПР, которая воспроизводит бы комплекс движений, выполняемых опытным оператором-сварщиком — решается созданием универсальных промышленных роботов с возможностями, учитывающими совокупное требование определенного типажа свариваемых изделий (операций).

*Вторая задача* — создание методов и средств для точного направления электрода по стыку — связана с автоматизацией перемещения электрода в пространстве, которое происходит по функциональному закону при обязательном соблюдении всех параметров этого движения. Это требование особенно важно, так как в подавляющем большинстве случаев при дуговой сварке плавлением исходная информация о стыке носит случайный характер, а технологические требования предусматривают точность перемещения по стыку 0,3–0,5 мм при скорости сварки 10–180 м/ч и диапазоне линейного перемещения 10–1000 см. Указанные отдельные характеристики процессов дуговой сварки требуют оснащения каждой из управляемых координат исполнительного робота регулируемы приводами и вызывают необходимость совмещения режимов контурного управления движением электрода и режимов сварки в едином программирующем устройстве. Причем информация о качестве сварочных работ должна автоматически вводиться от спе-

циальной системы информационного обеспечения ПР. В системах автоматизации наиболее сложных процессов дуговой сварки (например, сварки двух труб) для перемещения электрода требуются пять и более управляемых координат, как это показано на технологической схеме дуговой сварки (рис. 10.5).

Программа, по которой исполнительный робот выполняет свои движения, может быть введена в его запоминающее устройство несколькими способами: предварительным заданием с помощью внешнего программирования аналогично тому, как это делается у станков с ЧПУ; записью (заданием) непосредственно на рабочем месте (на пульте), для чего используются органы ручного управления манипуляционной системой; переписью из библиотеки программ с использованием специально создаваемых фондов, в которых долговременно хранится информация. Для универсальных роботов, какими в большинстве своем являются исполнительные, программирование осуществляется по второму способу, получившему название «обучение».

Суть обучения заключается в том, что, пользуясь выносным пультом, оператор выполняет первый технологический цикл управления движениями рабочих орга-

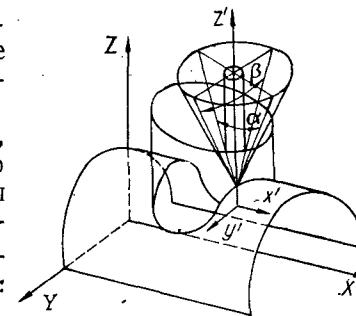


Рис. 10.5. Технологическая схема дуговой сварки: X, Y, Z, X', Y', Z' — связанные системы координат

нов вручную. При этом перемещение рабочего органа, обусловленное совокупным действием отдельных звеньев манипуляционной системы ПР, фиксируется соответствующими датчиками и записывается в 3У робота. При всей простоте процесс обучения робота сопровождается субъективными ошибками оператора, которые непроизводительно вносятся в программу вследствие неточного позиционирования или копирования траектории движения рабочего органа в процессе обучения. В процессе обучения ПР человек, управляющий им вручную, составляет совместно с роботом следящую систему и является ее замыкающим звеном. При этом рассогласование в системе в виде отклонения положения рабочего органа от заданного воспринимается оператором.

Зная передаточную функцию ПР и учитывая физиологические возможности оператора, осуществляющего его обучение, можно найти ошибку позиционирования (или рассчитать отклонение траектории рабочего органа от заданной) еще до начала процесса обучения с тем, чтобы скорректировать ее в процессе записи программы. При расчете возможной ошибки позиционирования следует учитывать, что ПР в процессе обучения является сложной динамической системой, доминирующим элементом которой при определении передаточной функции является манипуляционная система.

Другой распространенной технологической задачей, когда необходимо использование исполнительных роботов, является нанесение защитных покрытий на поверхности изделий методами распыления.

Поступательным перемещением  
линий

Вращением линный

### Смешанным перемещением линий

Конструктивное исполнение применяемых в этих случаях роботов в определенной мере зависит от методов распыления (требующих для своей реализации соответствующего исполнения рабочих органов, траекторий взаимного перемещения объекта и рабочего органа и др.) Однако наибольшее влияние на конструктивное исполнение манипуляционной системы ПР для нанесения защитных покрытий методами распыления оказывает конфигурация объектов, на которые наносятся покрытия. Именно свойствами и взаимным расположением окрашиваемых поверхностей объектов определяются характер движения рабочих органов ПР, схема и режимы окраски. При этом схема окраски в свою очередь зависит от возможного сочетания относительных движений рабочих органов ПР и окрашиваемого объекта. Некоторые из возможных сочетаний движений, необходимых для окраски объектов различных классов, а также кинематические структуры манипуляционных систем ПР, обеспечивающих совокупное движение рабочих органов при окраске, приведены в табл. 10.2.

Реализация траекторий, необходимых для окраски объектов, может осуществляться следующим сочетанием движений:

все необходимые для окраски движения совершает окрашиваемый объект. Рабочий орган робота при этом неподвижен;

все необходимые для окраски движения совершает рабочий орган окрасочного робота. Объект неподвижен;

одно или ряд движений, необходимых для окраски, совершает рабочий орган, а остальные — объект;

все необходимые для окраски движения совершает рабочий орган окрасочного робота, а объект совершает движение транспортирования, не являющееся необходимым для окраски.

По мере усложнения окрашиваемой поверхности (или совокупности поверхностей) объекта, а также при переходе от одного класса поверхностей (например, образованных поступательными движениями) к другому (в частности, вращательными движениями) необходимо увеличивать число степеней подвижности рабочего органа ПР. Так, для окраски внутренних поверхностей объектов, образованных вращением замкнутой линии (кузов автомобиля), требуется ввести рабочий орган внутрь объекта при наличии двух технологических (окрасочных) движений; поэтому число степеней подвижности манипуляционных систем таких роботов может достигать до четырех и более.

### 3. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПР В СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

Трудоемкость сборочных процессов в целом по машиностроению составляет 25 %, а в отдельных отраслях приборостроения — 60 % и выше; при этом доля автоматической сборки не превышает соответственно 7 и 18 % общей трудоемкости сборочных работ. В условиях повышения степени автоматизации производства отдельных деталей относительная трудоемкость сборочных процессов, а следовательно, и число обслуживающего персонала не только не уменьшается, а на-

оборот, возрастает. В связи с этим перспективно широкое использование ПР в сборке.

Комплексную механизацию и автоматизацию сборочных процессов можно осуществлять двумя путями: созданием узкоспециализированных автоматов и сборочных автоматических линий [67]; использованием универсальных быстропереналаживаемых технологических позиций и линий на базе ПР [73].

Автоматизация на основе специальных автоматов целесообразна при программе выпуска 500 тыс. изделий в год и более и условии сохранения этой программы в течение двух лет. Кроме того, наиболее рентабельной областью применения сборочных автоматов принято считать изделия, комплектуемые из 4—12 деталей.

При использовании ПР оказывается экономически оправданной сборка изделий, имеющих значительно меньшую серийность, причем количество комплектующих деталей не является лимитирующим, так как оно может быть учтено объемом памяти системы программного управления роботом и набором сменных захватных устройств под номенклатуру комплектующих сборочное соединение деталей.

Сборочный РТК содержит ряд функциональных устройств, которые могут отсутствовать в комплексах другого назначения, а именно: загрузочно-ориентирующие устройства, накопители деталей и сборочных соединений, в которых объекты принимают и сохраняют строго ориентированное положение;

питатели и устройства поштучного отделения объектов для выдачи их на позицию «опроса» ПР;

технологические устройства, осуществляющие фиксацию деталей в сборочном соединении свинчиванием, склеиванием, свариванием, запрессовкой, развальцовкой, склепыванием и т. д.;

устройства специального назначения, обеспечивающие нанесение флюса, клеящих и герметизирующих составов, смазочно-защитных покрытий и др.;

устройства компенсации неточности позиционирования рабочих органов робота при совмещении контуров сопрягаемых деталей;

оснастка, а также контрольные приспособления для проверки правильности осуществления операции;

приемная тара и транспортные устройства для отвода готовой продукции со сборочной позиции.

Учитывая, что сборочные процессы являются ввиду их многообразия и жестких требований, предъявляемых к качеству проведения, наиболее сложными, начинать их роботизацию целесообразно со сборки простых узлов и выполнять поэтапно. Так, на первых этапах рекомендуется использовать ПР на операциях установки базовой детали на технологическую позицию или конвейер автоматической линии и снятия с нее собранного соединения. В дальнейшем переходят к операциям склеивания, точечной сварки, а по мере накопления опыта — к более сложным операциям свинчивания, селективной сборки высокоточных соединений и др.

Исходными данными для проектирования технологического процесса роботизированной сборки на действующем производстве явля-

ются: чертеж изделия с чертежами всех входящих в него элементов; масса и габаритные размеры изделия; технические условия на изготовление и приемку изделия; условия труда на сборке и характеристика рабочих движений и функций оператора-сборщика; применяемое оборудование, приспособления и инструмент; подробный действующий техпроцесс с указанием трудоемкости; наличие производственных площадей; сменность работы\*.

Основой для проектирования сборочного РТК является технологическая схема сборки, которая отражает последовательность и структуру процесса. На основании технологической схемы и анализа рабочих движений оператора-сборщика предварительно выбирают модель ПР и разрабатывают циклограмму движений по узловым точкам этой схемы. В дальнейшем проводится ориентировочный расчет производительности комплекса с учетом разработанной циклограммы и технических характеристик (скоростей, переходных процессов) выбранного ПР.

Следующий этап проектирования сборочного РТК — оснащение роботизированного сборочного комплекса, что определяется функциональными возможностями ПР, которые ограничены жесткими границами обслуживаемой рабочей зоны, количеством и видом степеней подвижности, погрешностями повторяемости движений, отсутствием, в большинстве случаев, средств восприятия внешней среды и информации о внутреннем состоянии элементов ПР и др. Расширение технологических возможностей ПР достигается разработкой и изготовлением специальной сборочной оснастки: подающие и отводящие устройства, технологические модули локальных перемещений и ЗУ, контрольно-измерительные устройства и устройства для сопряжения деталей\*\*.

В дальнейшем, с развитием систем адаптации ПР, постепенно будет снижаться удельный вес устройств строгой ориентации деталей и соединений, подаваемых в рабочую зону ПР. Вместе с тем функции контроля качества подаваемых на позицию сборки объектов будут осуществляться ЗУ, снабженными элементами осязания. Анализ отказов сборочного оборудования показывает, что в 90 % случаев причиной являлось низкое качество собираемых деталей, а для устранения неполадок достаточно было привести качество всех деталей в соответствие с техническими требованиями. Это обстоятельство тем более следует учитывать при автоматизации сборочных операций на основе роботизированных технологий.

Особое значение при создании сборочных роботизированных технологий приобретает выбор методов компенсации неточностей взаимной ориентации деталей при их сборке ПР. Выделяют следующие направления обеспечения сопряжений деталей при роботизированной сборке [23, 33, 39, 46]:

\* Подготовка сборочного роботизированного производства осуществляется в соответствии с перечнем этапов, изложенных в гл. II.

\*\* Состав и возможности ориентирующих, загрузочных, подающих, отводящих, накапливающих устройств РТК, средств осязания и захватных устройств ПР рассматривались в гл. III, VI, VII.

1) применение метода расчета размерных цепей в системе «робот — приспособление — деталь». При этом прямая сборка осуществляется с компенсацией допустимых неточностей позиционирования за счет фасок, ловителей, заходных конусов и т. д.;

2) расширение функциональных возможностей робота, направленных на увеличение вероятности сопряжения деталей. При этом сборка осуществляется на основании информации о характере взаимодействия сопрягаемых деталей;

3) создание автономных систем поиска удовлетворительного взаимного расположения сопрягаемых деталей. В этом случае задача

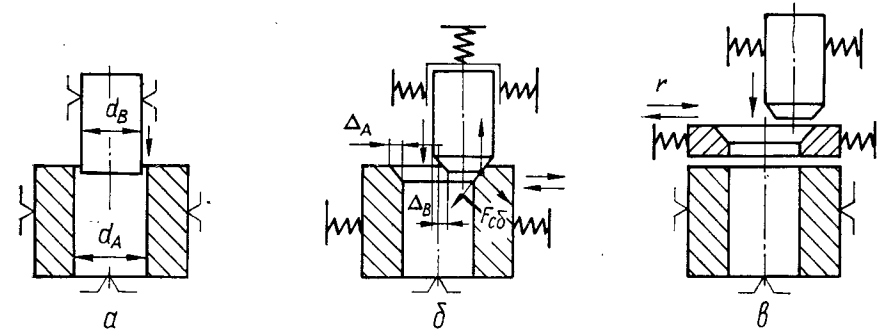


Рис. 10.6. Схемы сборки с использованием размерных цепей: а — с жестким базированием; б — с нежестким базированием (для объектов с фасками); в — с ловителями

решается при использовании сборочных головок в составе ПР или РТК, осуществляющих взаимные направленные сканирующие движения поиска для элементов сборки.

Для первого направления наиболее распространенные способы сборки представлены на рис. 10.6. Вероятность сопряжения  $P_{сп}$  деталей для этого направления равна произведению вероятностей двух событий:  $P_{\tau}$  — попадание деталей с ЗУ робота в зону заходных контуров по транспортирующим координатам и  $P_0$  — образование угла перекоса детали по ориентирующим координатам:

$$P_{сп} = P_{\tau} [(\Delta_x, \Delta_y) \subset D] P_0 (\varphi < \varphi_{кр}),$$

где  $\varphi_{кр} = \arccos \frac{d_B}{d_B + z_{min}}$  — предельно допустимый угол взаимного перекоса осей сопрягаемых деталей;  $\varphi$  — текущее значение ошибки позиционирования по ориентирующим координатам;  $z_{min} = \delta_{A_{min}} - \delta_{B_{max}}$  — минимальный вероятностный зазор в сопряжении;  $\delta_A$  — отклонение размеров детали в системе отверстия;  $\delta_B$  — отклонение размеров детали в системе вала;  $D$  — допустимое смещение деталей, при котором гарантируется сборка.

Для прямой сборки по жесткой схеме (рис. 10.6, а)  $D = D_1 = Z$  —  $\Delta_0 - \Delta_{пр}$ ; при использовании нежесткой системы для деталей с фасками (рис. 10.6, б)  $D = D_2 = \Delta_A + \Delta_B + D_1$ ; в случае применения

ловителей или направляющих конусов (рис. 10.6, в)  $D = D_3 = r + D_1$ ;  $\Delta_x, \Delta_y$  — линейные погрешности позиционирования по координатам  $X$  и  $Y$ ;  $d_A, d_B$  — диаметры деталей соответственно в системе отверстий и в системе вала;  $r$  — радиус захвата детали ловителем;  $\Delta_A, \Delta_B$  — диаметральный размеры фасок сопрягаемых деталей.

Упрощенно для наихудшего случая базирования при условии линейности задачи и нормальном законе распределения ошибок позиционирования расчетная формула вероятности сопряжения имеет вид

$$P_{\text{сп}} = \left( \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-D}^{+D - \frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} dx \right) \left( \frac{1}{\sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} \int_{-\varphi_{\text{кр}}}^{+\varphi_{\text{кр}}} e^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\varphi \right),$$

где  $x$  — текущее значение ошибки позиционирования по транспортирующим координатам;  $\sigma_x$  — среднее квадратичное отклонение распределения случайной величины погрешности позиционирования захватных устройств робота по транспортирующим координатам (при отсутствии статистических данных  $\sigma_x = 1/3$  точности позиционирования по паспортным данным ПР);  $\Delta_\delta, \Delta_{\text{пр}}$  — ошибки изготовления посадочной поверхности относительно базовой и установления детали в приспособлении соответственно;  $\sigma_\varphi$  — среднее квадратичное отклонение распределения случайной угловой погрешности позиционирования робота по ориентирующим координатам (в случае отсутствия статистических данных  $\sigma_\varphi = \sigma_x / 2L_{\text{max}}$ , где  $L_{\text{max}}$  — длина руки робота на максимальном выдвигении).

Для гладких цилиндрических соединений, собираемых по «жесткой» схеме (рис. 10.6, а),

$$\varphi_{\text{кр}} = \arccos \frac{d_B}{d_B + \frac{\delta_B}{2} + \frac{\delta_A}{2} + Z - 1/2 \sqrt{\delta_B^2 + \delta_A^2}}.$$

В случае сборки тех же деталей с компенсацией погрешности позиционирования за счет фасок, ловителей, направляющих (рис. 10.6, в)

$$\varphi_{\text{кр}} = 90^\circ - \rho_T - \alpha - \gamma,$$

где  $\rho_T$  — угол трения;  $\alpha$  — угол наклона образующей конуса фаски;  $\gamma$  — угол между вектором силы сборки  $F_{\text{сб}}$  и осью вала.

Если вероятность сопряжения деталей не позволяет обеспечить достаточно надежную работу комплекса «робот — оснастка — деталь», переходят к исследованию возможности применения других направляющих сопряжения.

Расширение функциональных возможностей роботов, направленных на увеличение вероятности сопряжения деталей, основывается на использовании методов и средств тактильной (рис. 10.7, а) и зрительной (рис. 10.7, б) адаптации, а также повторных попыток сопряжения по заданной программе (рис. 10.7, в).

Для метода тактильной адаптации вероятность сопряжения деталей  $P_{\text{сп}} = 1$  при соблюдении условия  $\Delta_x = \Delta_y \leq \Delta_B + \Delta_A$ . При

этом сопряжение осуществляется коррекцией процесса сборки по информации от датчиков о силовом взаимодействии системы «захватное устройство — устанавливаемая деталь — базовая деталь».

При сопряжении на основе зрительной адаптации возможна организация процесса сборки из неориентированных деталей, причем камера 1 осуществляет общий обзор местности, а камера 2 — контроль точной установки детали. Однако стоимость информационного обеспечения в этом случае, а следовательно, и всего сборочного РТК, резко возрастает. Вероятность сопряжения  $P_{\text{сп}} = 1$  при выполнении условия  $M \leq Z_{\text{min}}$ , где  $M$  — разрешающая способность средств зритель-

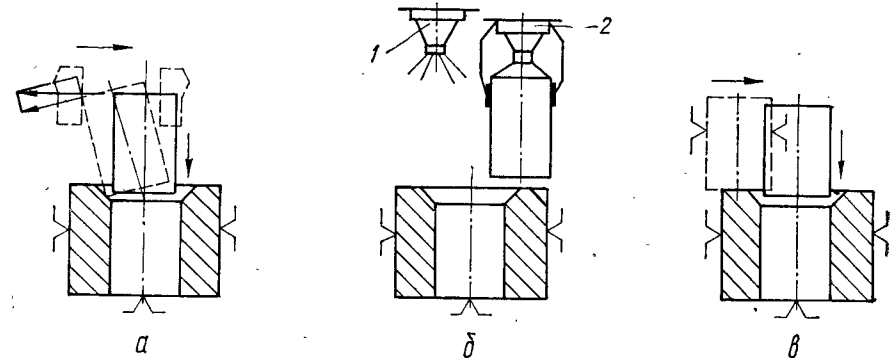


Рис. 10.7. Схемы сборки с использованием адаптивных систем:

а — с тактильной информацией; б — со зрительной информацией; в — с повторными попытками сопряжений

ного восприятия. Детали, собираемые с помощью визуальных сенсоров, должны иметь четкие контуры, градацию в отражательной способности, легко выявляемые особенности для идентификации и последующей ориентации, одинаковую окраску и др.

Характерной особенностью метода сопряжения с помощью повторных попыток по заданной программе (рис. 10.7, в) является неоднократно повторяющаяся после неудачных попыток операция сборки соединения с другими комплектами сопрягаемых деталей (при этом может заменяться либо одна из сопрягаемых деталей, либо полностью пара). Вероятность сборки при повторных попытках возрастает и определяется зависимостями

$$P_1 = P_{\text{сп}} [(\Delta_x, \Delta_y) \subset D] = P; \quad P_2 = 2P - P^2; \\ P_3 = 2P - 2P^2 + P^3; \quad P_4 = 2P - 2P^2 + 2P^3 - P^4,$$

где  $P_1 = 0,8$ ;  $P_2 = 0,96$ ;  $P_3 = 0,992$ ;  $P_4 = 0,998$ .

Следует, однако, учитывать, что цикл сборки увеличивается.

Создание автономных систем поиска удовлетворительного взаимного расположения деталей связано с разработкой сборочных головок, обеспечивающих условия для автоматического самоцентрирования деталей по сопрягаемым поверхностям формированием для одной из них (либо для обеих одновременно) определенного закона ориенти-

рующих движений. При этом используются движения автопоиска одной детали относительно другой следующим образом:

обе детали перемещаются в плоскости, перпендикулярной оси соединения, но по разным осям в этой плоскости и с разными частотами (рис. 10.8, а);

устанавливаемая деталь движется вдоль оси сборки, а базовая — получает движение, перпендикулярное этой оси (рис. 10.8, б);

базовая деталь неподвижна, устанавливаемая имеет поисковое движение, перпендикулярное оси сборки, а также движение по оси сборки (рис. 10.8, в).

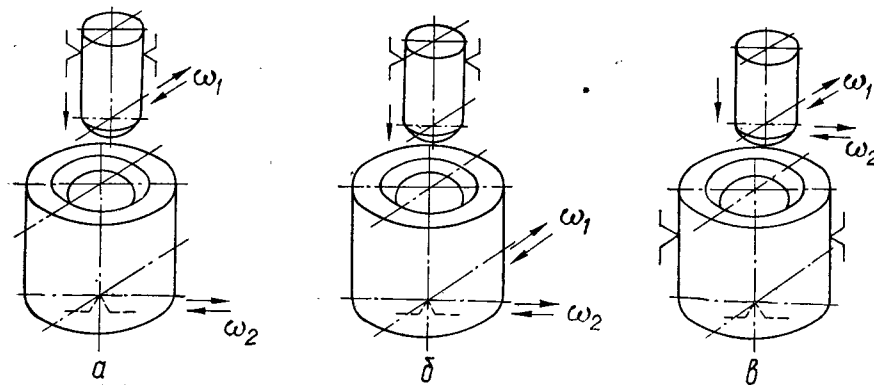


Рис. 10.8. Схемы сборки с использованием систем автопоиска элементов

Поиск, реализуемый сборочной головкой, может иметь любой закон движения  $\omega_1 = f(t)$ ,  $\omega_2 = F(t)$  — круговой, маятникообразный, возвратно-поступательный, расходящейся и сходящейся спирали, а также представлять совокупность этих и более сложных движений. Автономные системы поиска при этом будут различаться типом привода перемещения рабочих органов сборочных головок.

Наибольшими преимуществами при использовании в сборочных процессах обладают двурукие сборочные ПР, а также ПР со спаренными захватными устройствами, которые позволяют производить сборку без дополнительных базирующих устройств.

## Глава XI

### ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТОВ В ЧАСОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

#### 1. ПРЕДПОСЫЛКИ И СТРАТЕГИЯ РАЗРАБОТКИ РТК ДЛЯ СБОРКИ МЕХАНИЗМОВ НАРУЧНЫХ ЧАСОВ

Эффективность промышленной робототехники в настоящее время наиболее очевидна в часовой промышленности, которая характеризуется сочетанием сложности, прецизионности и массовости выпускаемой продукции. Здесь роботизиро-

ван почти весь парк обрабатывающих машин. Даже самые ответственные операции, требующие высокой профессиональной квалификации, — вплоть до установки системы баланс—спираль — выполняются автоматическими манипуляторами — минироботами. Круг решенных при этом задач очень широк.

Опыт роботизации часовой промышленности полезен специалистам отраслей, занятых массовым выпуском миниатюрной прецизионной продукции, например, точного приборостроения, радиоэлектроники, оптики и др.

Наиболее характерное оборудование для автоматизированной сборки наручных часов — это комплекс однотипных, унифицированных многопозиционных сборочных модулей линейного типа, взаимосвязь между которыми осуществляется технологической тарой. Эта тара служит средством межпозиционного транспорта часов внутри каждого сборочного модуля и накопителем для хранения межоперационного задела.

Вместе с тем сборочный модуль наделен способностью к операционной модернизации, под которой понимается возможность доукомплектации его новыми средствами автоматизации или модернизации старых. При этом модули обеспечивают возможность ручной сборки (при малой автоматизации выполняемой операции) и одновременно удобство обслуживания и наблюдения за работой всех исполнительных устройств модулей при повышении уровня автоматизации.

#### 2. ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА РТК

Каждая операция и каждый сборочный переход выполняются автоматическим манипулятором-минироботом, оснащенным средствами автоматической загрузки и системой циклового управления. Важнейшим компонентом сборочного комплекса является транспортно-базовый модуль (ТБМ), на котором минироботы устанавливаются в комплекте, обеспечивающем завершенность сборочной операции. При этом после каждой операции детали фиксируются с тем, чтобы они не рассыпались в условиях межоперационного хранения.

Компонентом, объединяющим ТБМ и минироботы всего комплекта в единое целое, является транспортная кассета. Она представляет собой линейку с пятью сквозными ступенчатыми гнездами под платину часов (основная базовая деталь собираемого часового механизма). На одной из боковых поверхностей линейки расположены пять трапециевидных пазов, взаимодействующих с механизмом внутримашинного транспорта ТБМ; на основных плоскостях линейки — система соответствующих друг другу выступов и углублений для взаимной фиксации кассет при складывании их в пакет, который является формой хранения межоперационного задела.

Пятиместная кассета-линейка определила кинематическую структуру ТБМ в виде многопозиционной сборочной машины линейного типа, содержащей следующие исполнительные механизмы:

механизм межпозиционного транспорта, выполненный в виде продольной штанги, на которой с пятикратным шагом между гнездами кассеты укреплены рычаги-толкатели, взаимодействующие с боковыми трапециевидными пазами кассеты. Штанге сообщается возвратно-поступательное перемещение на шаг между гнездами кассеты и маятниковое угловое перемещение для ввода и вывода толкателей из ее пазов;

входной магазин для пакета кассет, содержащего 200—400 механизмов, подлежащих сборке. Пакет вручную вставляется сверху в направляющие стенки магазина, в нижней части которого имеется срабатывающий один раз в пять циклов механизм отделения от пакета нижней кассеты и укладки ее в направляющие продольного транспорта ТБМ;

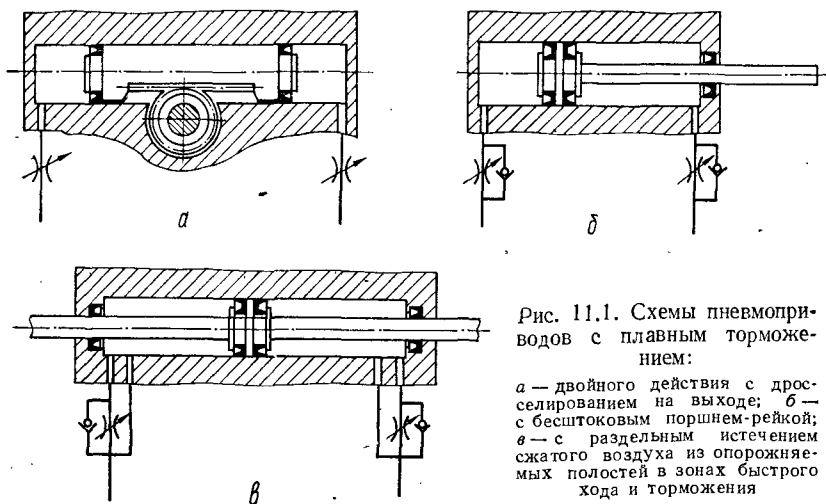
выходной магазин, где складываются кассеты с обработанными механизмами. Здесь пакет растет снизу вверх при срабатывании аналогичного предыдущему механизма. Установка и выемка пакетов кассет осуществляются на ходу, без остановки ТБМ;

комплект позиционеров — устройств для базирования пластины собираемого механизма на рабочих позициях. При этом пластина вынимается вверх из гнезда кассеты, фиксируется на базовых штифтах подставки позиционера и при необходимости поворачивается на любой, требуемый условиями выполнения

данной операции, угол. По окончании операции платина поворачивается в исходное положение и возвращается в гнездо кассеты. Возможно объединение нескольких ТБМ (чаще всего по два, реже по три) в единый ТБМ.

### 3. ПРИВОД, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СБОРОЧНОГО МОДУЛЯ

Привод всех исполнительных устройств ТБМ, а также минироботов — пневматический. Схемы используемых в данном комплексе пневмоприводов с плавным торможением показаны на рис. 11.1. Это, в основном, пневмоприводы двойного действия с дросселированием на выходе. Часто используются бесштоковые конструкции с выходом на приводимое звено через середину цилиндра (рис. 11.1, а).



Такое решение позволяет сократить число подвижных уплотнений и тем самым повысить надежность пневмопривода. Схемы, где используются дроссельные присоединения с обратными клапанами (рис. 11.1), удобны тем, что позволяют регулировать режимы перемещения в обе стороны независимо друг от друга. При малых габаритах (16...20 мм) пневмоприводов требуется исключительно высокое качество изготовления обратных клапанов: при малейшей утечке рабочего тела эффективность дросселирования резко снижается. В связи с этим иногда используются схемы с двусторонним дросселированием без обратных клапанов: их сложнее регулировать, но надежность выше. В длинноходовых пневмоприводах, от которых требуется одновременно высокое быстродействие и плавность торможения, используется иногда схема (рис. 11.1, в) с раздельным истечением выпускаемого из опорожняемой полости сжатого воздуха в зонах быстрого хода (где он выпускается напрямую) и торможения (через дроссель).

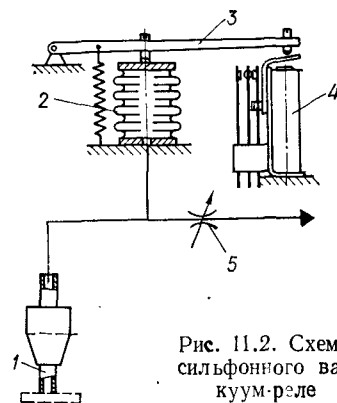
Система управления сборочного модуля построена по агрегатному принципу, т. е. каждый агрегат (ТБМ, миниробот) имеет свой набор пневмо- и электропереключателей, управляемых кулачками распределительного вала. Кулачки выполнены раздвижными, что позволяет в широких пределах варьировать их работу. Система управления работает следующим образом: срабатывают, совершая один оборот, распределительные валы командоаппаратов минироботов, которые запускают перед своей остановкой командоаппарат ТБМ; последний, в свою очередь, приводит в движение распределительные валы и т. д. Предусмотрена возможность автоматического повторения срабатывания того или иного миниробота, например, в случае отказа в системе автоматической загрузки.

Средства контроля сборочного модуля обеспечивают:

путовый контроль, т. е. проверку правильности и своевременности перемещений некоторых исполнительных органов. Например, перед началом передвижения кассет необходимо вернуть в исходное (нижнее) положение все позиционеры. Такие проверки осуществляются стандартными микропереключателями, в некоторых случаях — герконами (магнитоуправляемыми контактами); проверку правильности установки некоторых деталей в собираемое изделие. Например, прежде чем закрепить винтами мост с камневыми опорами, надо убедиться в правильности его установки на соответствующей плоскости платины собираемого механизма, что, в свою очередь, будет свидетельствовать о том, что цапфы накрываемых мостом звеньев вошли в его камневые опоры. Такие проверки осуществляются электроконтактными устройствами с малым измерительным усилием. Часто измерительные системы встраивают непосредственно в ЗУ миниробота. При обнаружении неисправности останавливается сборочный модуль, и подается соответствующий световой сигнал;

проверку наличия собираемых деталей в вакуумных присосках ЗУ минироботов, для чего используются специальные вакуумные датчики (рис. 11.2). Чувствительный элемент-сильфон 2 реагирует на величину разрежения в присоске 1. В случае отсутствия в ней детали исключается механический нажим рычага 3 на якорь реле 4. Дроссель 5 отделяет присоску от вакуумной магистрали и регулирует минимально достаточное для захвата детали разрежение.

При наличии в присоске детали сильфон сжимается, происходит нажим рычага на якорь реле и его контактные группы, включенные в систему управления сборочного модуля, срабатывают. При отсутствии детали останавливается сборочный модуль, и подается световой сигнал или автоматически повторяется срабатывание миниробота.



### 4. ВЗАИМОСВЯЗЬ ФУНКЦИЙ И КИНЕМАТИКИ МИНИРОБОТОВ

В функции миниробота входит выполнение следующих элементарных действий: взять ориентированную деталь из загрузочной емкости (бункера, магазина, кассеты), перенести ее к рабочей позиции и вставить в собираемое изделие — иногда с закреплением, иногда с вводом во взаимодействие с другими деталями. При наличии вспомогательных устройств детали, за редким исключением, устанавливаются движением ЗУ робота сверху вниз — при условии, что платина лежит горизонтально. Таким образом, для установки деталей в собираемое изделие ЗУ должно перемещаться вертикально, причем в ряде случаев может потребоваться достаточно высокая точность его позиционирования по оси установки (0,02...0,03 мм).

Предпринимались попытки автоматизировать сборку часов с помощью минироботов одной, обычно ортогональной, схемы. Однако при этом значительную часть деталей приходилось устанавливать вручную в связи с ненадежной работой сопряженных с ними загрузочных устройств, чаще всего вибробункеров. Поэтому схема миниробота должна прежде всего соответствовать оптимальным условиям автоматической загрузки устанавливаемых данным минироботом деталей. Для решения этой задачи возможны два подхода: первый — создать универсальный миниробот с увеличенным числом степеней подвижности ЗУ; второй — создать ряд простых минироботов с одной-двумя степенями подвижности ЗУ, совокупные возможности которых охватывают все многообразие типичных случаев автоматической загрузки и монтажа часовых деталей. При сборке наручных часов используются три схемы компоновки минироботов: М1 — двух-

модульный\* миниробот с ортогональной траекторией ЗУ; М2 — одномодульный маятниковый миниробот с наклонным выдвижением захватного устройства на позицию загрузки; М3 — двухзвенный (двурукий) миниробот, содержащий захватное устройство, перемещаемое только вдоль вертикальной оси, и вспомогательный горизонтальный питатель для подноса деталей из загрузочной емкости на линию действия захватного устройства.

## 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ И ОСНАСТКА ДЛЯ СБОРКИ МЕХАНИЗМОВ НАРУЧНЫХ ЧАСОВ

В состав оснастки, необходимой для сборочной операции, входят ЗУ миниробота, базовая подставка позиционера ТБМ и вспомогательные устройства (например, вибраторы), используемые в особых случаях.

К типичным приемам сборки механизма наручных часов относятся установка, фиксация и смазка базовых деталей. Рассмотрим эти приемы и особенности конструкции соответствующей им оснастки.

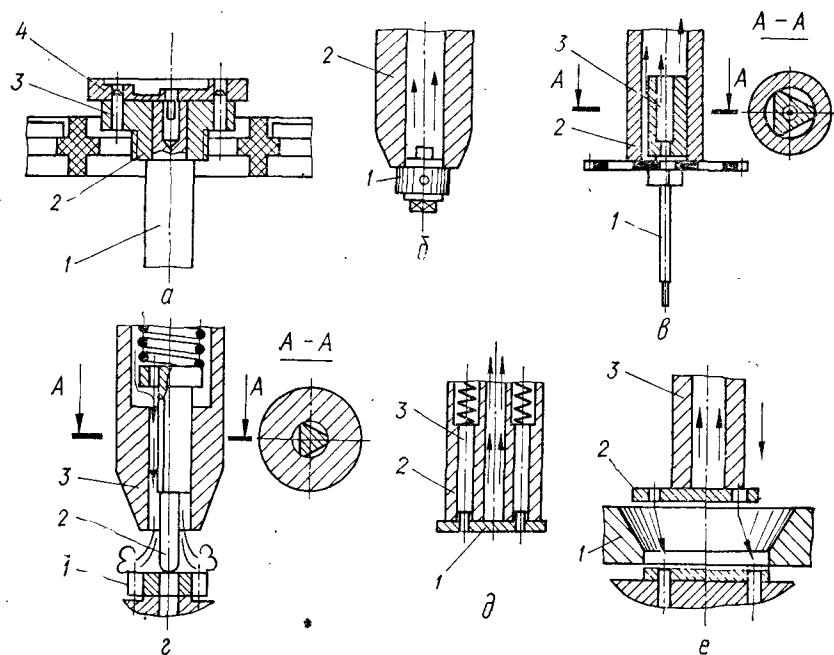


Рис. 11.3. Оснастка для сборки (установки) элементов наручных часов:

а — пластина на базовой подставке позиционера (ТБМ); б — присоска для вала барабана; в — присоска для узла секундного колеса; г — установка мелких колес продувов по штифту-ловителю; д — присоска с фиксатором углового положения детали; е — установка плоских деталей через трафарет

Обычно базовая подставка (рис. 11.3, а) — это одетый на шток 1 позиционера грибок 2 с двумя базовыми штифтами 3 под соответствующие отверстия (рабочие точки) пластины 4 собираемого механизма. При подъеме позиционера пластина одевается на эти штифты под собственной массой.

**Установка.** При вертикальной установке деталь вставляется в собираемый механизм сверху, без каких-либо вспомогательных манипуляций. Простейший

\* Под модулем перемещения понимается блок пневмопривод — направляющая — подвижной элемент (ползун).

случай — установка тел вращения, когда не требуется угловой фиксации деталей. В таких случаях вакуумная присоска ЗУ выполняется в виде втулки 2 (рис. 11.3, б), отверстие которой используется и для базирования устанавливаемой детали 1. Иногда во втулке 2 имеется вкладыш 3 с отверстием для базирования (обычно по малым диаметрам) и каналами для удержания детали 1 (рис. 11.3, в).

Большинство деталей наручных часов обладает малой массой. В связи с этим часто возникает задача, как оставить деталь в собираемом механизме, отделить ее от слегка замасленного или подмагнитченного ЗУ.

Разделить детали проще всего подачей через присоску в соответствующий момент импульса сжатого воздуха. Это особенно удобно, когда деталь базируется в ЗУ на утапливаемом ловителе 2: движение ЗУ прекращается в момент встречи ловителя с сопрягаемым элементом собираемого изделия (рис. 11.3, г), и установка детали 1 завершается под напором сжатого воздуха из присоски 3.

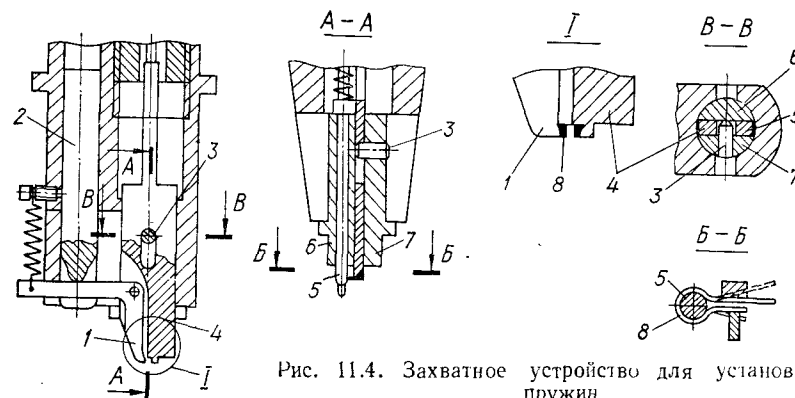


Рис. 11.4. Захватное устройство для установки пружин

Если деталь 1 требует угловой фиксации, ЗУ, кроме присоски 2, оснащается еще и ловителем-фиксатором 3, обычно подпружиненным (рис. 11.3, д).

Возможна установка детали с помощью трафарета 1, укрепленного над сборочной позицией (рис. 11.3, е). Собираемый механизм находится под трафаретом, а деталь 2 устанавливается сверху через окно последнего. Стенки окна — конические и являются направляющими деталей, удерживаемых плоской присоской 3. В результате конструкция ЗУ упрощается, и отпадает необходимость точно координировать миниробот относительно сборочной позиции.

**Установка упругих деталей** в механизме наручных часов имеет свои особенности. Мелкие скобообразные пружины (рис. 11.4) перед установкой в часы предварительно сжимают в ЗУ рычажной лапкой 1, приводимой в движение пневмоприводом 2, встроенным в корпус захватного устройства. Лапка 1 качается на шарнире в планке 4, поджатой вниз пружиной, которая одета на ловитель 5, до упора в винт 3.

При опускании ЗУ на собираемый механизм ловитель 5 и планка 4 останавливаются на пластине, и пружина 8 выталкивается нижним торцом вставок 6 и 7 в соответствующее углубление механизма, где она разжимается и занимает рабочее положение.

Тонкие фигурные пластины 1 с упругими отростками (рис. 11.5) вначале одевают на штифты собираемого механизма, а затем заводят упругий отросток за поджимаемый элемент (штифт 5) детали, которая была установлена раньше. Деталь захватывается вакуумной присоской 4 с фиксацией на утапливаемых ловителях 2. Ввод упругого отростка производится скошенной поверхностью рычажной лапки 3, приводимой поршнем 6.

**Установка с прокручиванием** производится при сборке квадратных сопряжений и при вводе в зацепление зубчатых колес, вращающихся на неподвижных осях. Рассмотрим установку заводного вала 1 (рис. 11.6), который сопрягается с одной из сидящих на нем деталей — кулачковой муфтой 8. Операция выпол-

няется комбинированным ЗУ, содержащим вакуумную присоску 6 для муфты 8 и заводного триба 9, устанавливаемых внутрь пластины 7 (Т-образное окно), и пинцет 5 для вала 1, смонтированный на горизонтальной ползушке 4. Другим исполнительным органом является шпindel с патроном 2 для вращения головки заводного вала.

При движении шпинделя на собираемый механизм упор 3, нажимая на ползушку 4, вдвигает вал в платину. При несовпадении сторон квадратов муфты и вала последний начнет проворачиваться внутренним конусом патрона 2, на-

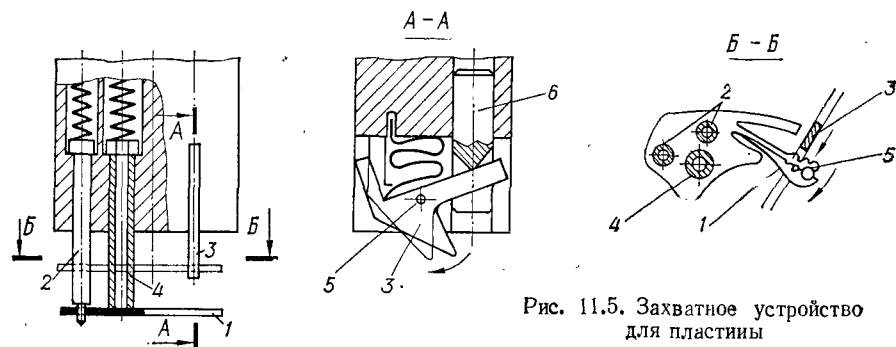


Рис. 11.5. Захватное устройство для пластины

жимающего на головку вала. Шпindel патрона вращается от специального электродвигателя.

При вводе в зацепление зубчатых колес, вращающихся на неподвижных осях, одно из колес прокручивают на завершающем этапе его установки (рис. 11.7). Кроме присоски 1 для устанавливаемого колеса 2, ЗУ оснащено втулкой 4, надетой на сопрягаемое колесо 3, установленное в собираемый механизм раньше. На нижнем торце втулки 4 нарезан коническо-зубчатый венец, диаметром и числом зубьев аналогичный сопрягаемому колесу 3. Во втулке 4 имеется винтовой паз 5, в который входит штифт 6.

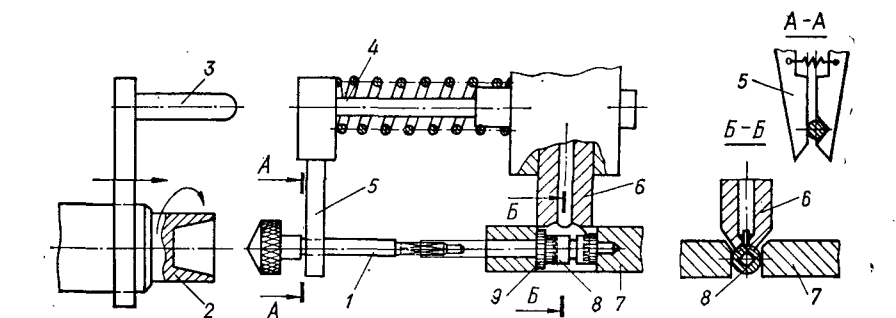


Рис. 11.6. Схема установки группы деталей заводного вала

При опускании захватного устройства на собираемый механизм втулка 4, будучи поджата пружиной к остановившемуся колесу 2, войдет с ним в зацепление и провернет его (в результате проскальзывания штифта 6 по винтовому пазу 5), вводя в зацепление с колесом 3.

**Вибрационная подводка** — один из методов установки деталей в полукрытые полости. Типичный для часового механизма случай — установка узла барабана (пружинного двигателя). В пластине имеется углубление 1 (рис. 11.8), стенки которого центрируют барабан 3 с точностью, обеспечивающей попадание цапфы его вала в опорное отверстие. Благодаря этому достаточно сбросить ба-

рабан над углублением даже со значительным смещением относительно центра последнего: под действием вибратора-встряхивателя, боек 2 которого постукивают по пластине сверху, барабан самоустановится в углублении.

Конструкция вибратора, используемого для встряхивания собираемого механизма на базовой подставке позиционера, показана на рис. 11.9. Это мини-

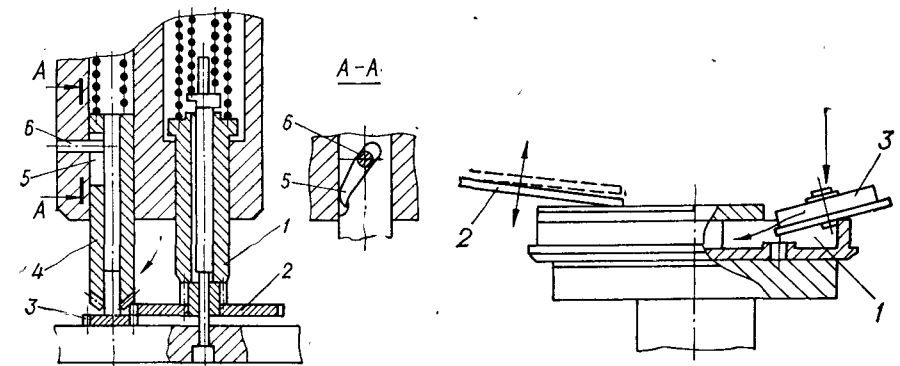


Рис. 11.7. Захватное устройство для одевания на ось и ввода в зацепление зубчатого колеса

Рис. 11.8. Установка узла барабана вибрационным подныриванием

атюрный электромагнитный вибратор, подвешиваемый на шарнире 1 и опирающийся бойком 2 на собираемое изделие. Настройка в резонанс осуществляется подбором массы груза 3.

Во многих случаях целесообразнее устанавливать детали, вводимые в зацепление, на одной позиции одновременно группой, комплектуемой на загрузоч-

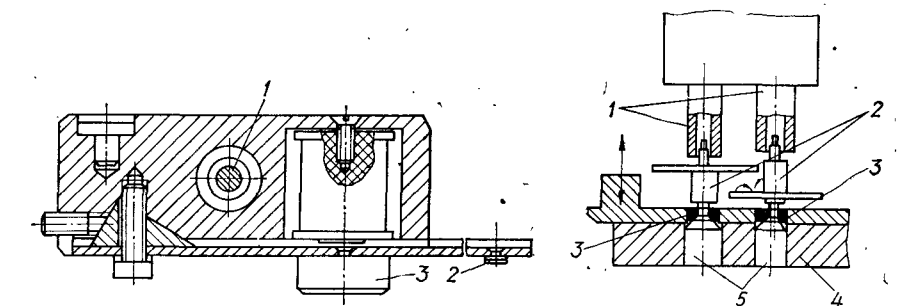


Рис. 11.9. Вибратор-встряхиватель

Рис. 11.10. Элементы системы вибромагнитной сборки колесных механизмов для установки узлов триб-колесо в кремневые опоры пластины

ной позиции. При групповой установке требуется меньшее число мини-роботов, меньше сборочной оснастки; такая установка более удобна в обслуживании. Групповая установка широко используется в описываемом комплексе технических средств (в частности, она стала доминирующей при сборке ангренажа)\*. В устанавливаемую группу обычно входят два-четыре узла, опоры вращения которых размещены в одном месте.

\* Ангренаж — зубчатая передача хода часов.

Установка нижних цапф узла триб-колесо в камневые опоры платины осуществляется вибромагнитным методом [1]. Захватное устройство, оснащенное группой вакуумных присосок 1 (рис. 11.10), отпускает (при отключении вакуума) устанавливаемые узлы 2 таким образом, чтобы их нижние цапфы оказались вблизи опорных отверстий часовых камней 3, и поддерживает узлы в вертикальном положении. Собственно установка происходит под комбинированным действием соосных с часовыми камнями постоянных магнитов\* 5, укрепленных в базовой подставке 4, и вертикальной вибрации, сообщаемой пластине вибратором. При подбрасывании узел постепенно смещается к оси постоянного магнита. После западания цапфы в отверстие часового камня возросшая сила притяжения к магниту фиксирует установленный узел.

Наиболее сложной и ответственной частью сборки ангренажа является установка моста с камневыми опорами, которые надо поместить на верхние цапфы установленных на предыдущей позиции узлов триб-колесо. Несмотря на то что нижние цапфы трибов уже находятся в камнях платины, их верхние цапфы могут значительно сместиться от требуемого положения, что требует их центрирования. Задача центрирования усложняется малой механической прочностью устанавливаемых деталей. Например, диаметр цапфы анкерного триба часов «Слава» составляет 0,08 мм. Для таких условий предназначен метод *двухэтапной вибромагнитной установки*, сущность которого заключается в следующем [2]. На первом этапе мост, удерживаемый вакуумной присоской ЗУ, опускается до уровня гарантированного зазора между нижними плоскостями камневых опор и верхними концами цапф. Величина зазора — 0,05...0,1 мм. После этого включается вибратор-встряхиватель, сообщающий пластине вертикальные колебания. Под действием этих колебаний верхние цапфы накрываемых звеньев ангренажа вытягиваются вдоль силовых линий между постоянными магнитами, расположенными соосно с опорами в базовой подставке и корпусе ЗУ. При этом магниты имеют возможность самоустанавливаться по кратерам-масленкам часовых камней моста. Выдержка времени на вибромагнитное «вытягивание» осей накрываемых звеньев ангренажа составляет 0,03—0,5 с, после чего происходит второй этап — окончательная установка моста. Усилие установки определяется пружиной.

Правильность установки контролируется двулучем рычагом, контактирующим с электрически изолированным от массы стержнем. Разрыв контакта происходит только при недосадке моста, когда рычаг касается его своим коротким плечом.

При отводе ЗУ вверх его магниты могут потянуть за собой узлы триб-колесо вместе с лежащим на них мостом. Чтобы этого не произошло, ЗУ оснащено массивным подвижным пальцем-грузом, расположенным в полости, соединенной с вакуумной системой присоски. Когда вакуумная система включена, груз втянут вверх и не касается моста; при отключении вакуумной системы груз опускается на установленный мост и остается там до тех пор, пока магниты не поднимутся на высоту, исключающую отрыв моста.

Вибромагнитные методы использованы при автоматизации одной из завершающих операций сборки механизма наручных часов — установки комплекта баланс—волосок — мост баланса. Выполнять ее надо очень осторожно, так как волосок, представляющий собой завитую в спираль Архимеда ленточку, имеет толщину до 0,02 мм, а диаметр цапф оси баланса — 0,08 мм.

В исходном положении мост и баланс, удерживаемые каждый своей присоской, разведены по вертикали. Затем присоска баланса (она выполнена качающейся относительно корпуса захватного устройства) отводит баланс в сторону для того, чтобы при опускании в часы он прошел мимо колеса и моста, которые были установлены раньше. После этого вакуум в присоске баланса снимается и последний «подныривает» под преграду, куда его подтягивает растянутый волосок, самоустанавливается нижней цапфой в камневую опору платины и входит во взаимодействие с анкерной вилкой. Эти действия совершаются с помощью постоянных магнитов, находящихся под механизмом в базовой подставке позиционного ТБМ, и вибратора, боек которого постукивает по собираемому механизму сверху. Один из магнитов расположен соосно с камневой опорой баланса,

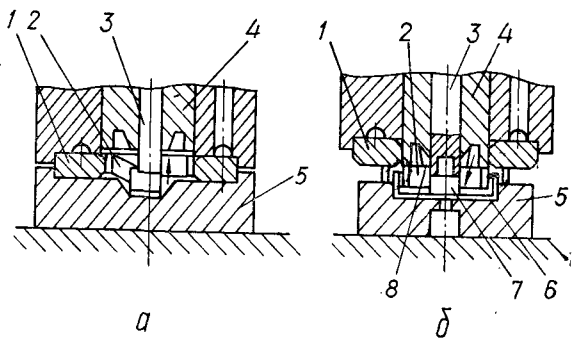
другой — таким образом, чтобы зафиксировать в определенном положении анкерную вилку. Операция завершается окончательной вертикальной установкой моста баланса на платину, вакуумная система присоски моста отключается, и она вместе с мостом опускается вниз под действием слабой пружины. При этом мост соскальзывает вниз по фиксирующему его угловое положение ловителю, который находится за присоской.

Описанная процедура автоматической установки баланса в наручные часы (внедрена на 2-м Московском часовом заводе) показывает, что самые сложные действия (установка цапф в камневые опоры и ввод во взаимодействие с анкерной вилкой) происходят сами по себе, без приложения каких-либо сил со стороны миниробота. Такая процедура называется *самоустановкой*.

**Фиксация.** Одним из способов фиксации является *запрессовка*. Захватные устройства для запрессовки деталей отличаются от ЗУ для обычной установки тем, что присоска, или вакуумная втулка, посредством корпуса или кронштейна жестко крепится на ползуне вертикального модуля миниробота. Обычно при запрессовке сопряжение запрессовываемой детали с собираемым изделием (базовой деталью) обеспечивается заходными фасками и соответствующей точностью позиционирования сопрягаемых

Рис. 11.11. Схема установки заводной пружины в узел барабана:

а — устройство заневоливания центрального витка пружины;  
б — позиция перестановки пружины из спутника в собираемый узел



элементов. Однако иногда такие условия отсутствуют, в частности, при сборке пружинного двигателя — узла барабана наручных часов. Рассмотрим процесс сборки пружинного двигателя часов.

Пружины 2 (рис. 11.11) поступают на сборку в соответствующий автомат в технологических кольцах-спутниках 1. Внутренний виток пружины, который нужно одеть с натягом на вал барабана, выполняется со значительным разбросом по диаметру и, кроме того, обычно произвольно смещен относительно центра кольца-спутника.

При автоматизации установки пружины надо, во-первых, установить на центр внутренний виток пружины и, во-вторых, этот виток одеть на вал барабана, диаметр которого на участке сопряжения больше диаметра витка, а заходные фаски отсутствуют.

Первая задача решается на промежуточной загрузочной позиции (рис. 11.11, а), где в подставке 5 под заневоленную в спутнике 1 пружину 2 выполнено углубление, имеющее форму усеченного конуса, малый диаметр которого равен максимально возможному диаметру внутреннего витка пружины. Захватное устройство 4 оснащено подпружиненным ловителем 3, диаметр которого гарантированно меньше отверстия витка. При опускании ловитель, если он не попал в отверстие витка, продавливает виток в углубление. Коническая поверхность сдвигает виток в центр и, благодаря своей упругости, он одевается на ловитель.

Вторая задача (рис. 11.11, б) решается конусом 8, выполненным на рабочем торце пуансона 3, под нажимом которого пружина 2 должна быть вытолкнута из спутника 1 и вставлена в барабан 6, с одновременным одеванием ее внутреннего витка на вал 7. В тот момент, когда при опускании ЗУ 4 внутренний виток пружины будет остановлен уступом вала, конус 8 своим острием начнет раздвигать виток изнутри. В результате этого виток соскользнет с уступа и за счет своей упругости схватит посадочный участок вала барабана, установленного на подставке 5.

\* Триб устанавливаемого узла изготовлен из стали (т. е. из ферромагнитного материала), колесо обычно латунное.

**Завинчивание винтов** — первая операция при автоматизации сборки любого скрепляемого резьбой изделия. Слабым звеном у наиболее распространенных винтовёртов с шестеренчатым редуктором является редуктор: из-за малых габаритных размеров его звенья вращаются в опорах скольжения, что приводит к их быстрому износу. В настоящее время создана конструкция отечественного винтовёрта [7], в которой этот недостаток устранен.

Часто детали наручных часов, например, мосты ангренажа, крепятся несколькими винтами, расстояние между которыми всегда меньше диаметра винтовёрта со встроенным электродвигателем. Поэтому завинчивание приходится производить на нескольких следующих друг за другом позициях сборочного модуля. Иногда это может привести к тому, что после завинчивания первого винта противоположный край моста приподнимается (из-за погрешностей геометрии

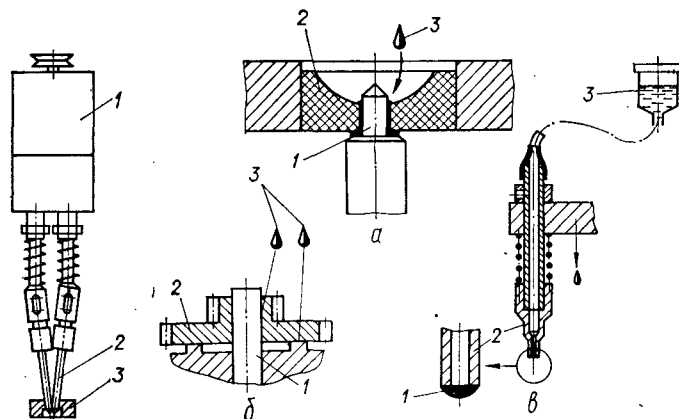


Рис. 11.12. Многошпиндельный винтовёрт для группового завинчивания винтов

Рис. 11.13. Элементы системы смазки вращающихся звеньев часового механизма:

а — кремневая опора узла триб-колесо; б — ось вращения блока шестерен ремонтуара; в — капиллярная маслodosировка

сопрягаемых опорных поверхностей), и верхние цапфы узла триб-колесо выйдут из отверстий часовых камней моста. После этого завинчивание следующих винтов становится бессмысленным.

Для решения проблемы существуют два пути. Один из них — последовательное завинчивание нескольких винтов на одной позиции, где прикрепленный мост все это время поджимается к платине специальным прижимом. В данном случае кроме усложнения конструкции минироботов вдвое-трое удлиняется время цикла завинчивания, а вместе с ним — и всего сборочного модуля. Второй путь — одновременное (групповое) завинчивание группы винтов на одной позиции — рациональнее первого. Для этого был создан многошпиндельный миниробот — винтовёрт СГ405, который позволяет завинчивать винты, расположенные практически вплотную друг к другу [5]. Конструкция шпиндельного блока этого винтовёрта показана на рис. 11.12.

Корпус 1 и кондукторная плита 3 жестко связаны между собой и укреплены на направляющих скалках вертикального модуля миниробота. Габаритный диаметр шпинделя — 5,5 мм. Карданное сочленение между отверткой и валом шпинделя позволяет несколько перекосить оси отверток 2 и тем самым завинтить винты, головки которых расположены практически вплотную друг к другу. Такой перекося допустим, так как при ручном завинчивании строгое совпадение осей винта и отвертки маловероятно.

Удобство смены износившегося инструмента и регулировки отверток предопределило широкое и быстрое внедрение минироботов-винтовёртов СГ405 в отечественной промышленности. Широкое распространение получили эти винтовёрты и в одношпиндельном исполнении, успешно конкурируя с винтовёртами со встроенными электродвигателями.

**Смазка.** Смазка трущихся поверхностей часового механизма также осуществляется минироботами. Наиболее распространенная операция этого типа — нанесение жидкой смазки на опоры вращения звеньев зубчатой передачи часов. На рис. 11.13, а показана конструкция каменной опоры узла триб-колесо: цапфа вала 1 вращающегося звена находится в отверстии камня 2, на внешней стороне которого выполнено овальное углубление — масленка, куда после сборки вносятся небольшая доза смазки 3. Другая характерная операция — смазка неподвижной оси 1 вращения (рис. 11.13, б). Здесь смазку 3 надо нанести до установки вращающегося звена 2.

Используются два метода нанесения смазки и соответственно два типа смазочных устройств.

**Капиллярная смазка** осуществляется с помощью капиллярных дозаторов (рис. 11.13, в). Исполнительный элемент дозатора — капиллярный наконечник 2 через гибкий шланг связан с резервуаром 3 для часового масла, который укрепляется на какой-либо стойке с возможностью регулировки уровня масла в нем относительно уровня наконечника. Используются также унитарные капиллярные дозаторы, в которых наконечник и резервуар смонтированы вместе. Диаметр капилляра и уровень масла в резервуаре подобраны таким образом, что самопроизвольного истечения масла из наконечника не происходит. При отсутствии контакта со смазываемой поверхностью на выходе капилляра смазка образует мениск 1. В момент прикосновения к смазываемой поверхности наконечник оставляет на ней дозу смазки, величина которой примерно равна объему мениска.

При нанесении смазки капиллярным дозатором на каменную опору обычно используют только вертикальный модуль миниробота. При нанесении смазки на вертикальную ось используются оба модуля: вертикального и горизонтального перемещения рабочего органа. Вначале происходит опускание дозатора на уровень точки смазки, а затем — горизонтальное перемещение до соприкосновения со смазываемой осью. Дозаторы монтируются на ползуне манипулятора не жестко, а через мягкий упругий буфер или поджимаются к смазываемой поверхности только под действием собственной массы.

**Смазка маслом** по сути воспроизводит обычный ручной процесс. При автоматизации этого процесса требуется обеспечить постоянство уровня масла в емкости, в которой обмакивается смазочный наконечник. Смазочные наконечники, посредством кронштейна укрепленные на вертикальном модуле манипулятора, обмакивают в углубления, выполненные на верхнем торце вкладышей, запрессованных в корпусе. Вдоль образующей вкладышей профрезерованы пазы, через которые масло периодически прокачивается вверх. Прокачка осуществляется мембраной, под которую масло медленно подтекает из резервуара через дроссель. В момент, когда наконечники опускаются на смазываемое изделие, винт нажимает на шток и масло вытесняется из-под мембраны, поднимаясь по пазам выше уровня вкладышей, попутно их торцевые углубления. При освобождении штока излишек масла откачивается обратно. Остаток масла во вкладышах практически не имеет менисковой выпуклости (или углубления), т. е. масло находится строго на уровне острого верхнего края их торцевых углублений.

Отсутствие капиллярных каналов гарантирует бесперебойность подачи масла, а относительно небольшая площадь открытой поверхности масла, его регулярное перемешивание сводят к минимуму его загрязняемость.

Программа, по которой работает в данном случае миниробот, та же, что и при установке деталей. Некоторой модернизации эти минироботы требуют при смазке вертикальных поверхностей: их вертикальный модуль через средство клиновой прокладки устанавливается наклонно.

## 6. МОДИФИКАЦИИ МИНИРОБОТОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ И НАКЛОННЫМ ДВИЖЕНИЯМИ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА

Двухмодульный миниробот с ортогональным движением ЗУ (схема М1). Миниробот М1 состоит из двух модулей перемещений: длинноходового горизонтального, служащего для переноса деталей, и короткоходового вертикального, работающего на этапах захвата и установки деталей. Чаще других используется схема, когда ЗУ монтируется на ползуне вертикального модуля, который, в свою очередь, укреплен на ползуне горизонтального модуля. Некоторое увеличение перемещаемых горизонтально масс компенсируется тем, что такой миниробот можно использовать на запрессовке деталей. Отсутствие передаточных устройств между пневмоприводами и ползунами, простота взаимодействия звеньев сделали эту схему популярной.

Некоторые трудности вызывают обеспечение плавного торможения длинноходового горизонтального перемещения. В большинстве случаев эта задача решается дросселированием на выходе на протяжении всего хода, что несколько

снижает быстродействие миниробота. Так, в минироботе УЭСО 2720 использован (описанный выше) пневмопривод с разделным истечением выпускаемого из опорожняемой полости сжатого воздуха в зонах быстрого хода и торможения. Это позволило добиться эффективного замедления без снижения быстродействия.

При использовании такого пневмопривода диапазон регулировки упоров

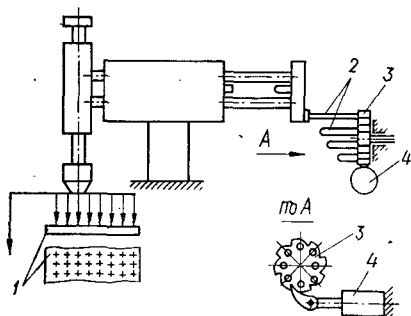


Рис. 11.14. Принципиальная схема миниробота с переменной координатой точки захвата

горизонтального хода не должен выходить за пределы зоны эффективного торможения, которая обычно невелика и составляет несколько миллиметров.

При сборке наручных часов применяется два вида многокоординатных модификаций минироботов типа М1. Модификации *первого вида* предназначены для последовательной установки одинаковых деталей в нескольких точках собираемого механизма. Позиция ЗУ при этом одна.

Ко *второму виду* многокоординатных модификаций робота типа М1 относятся такие, в которых миниробот должен забирать устанавливаемые детали из разных точек, например, из расположенных в одном ряду гнезд прямоугольной кассеты 1 (рис. 11.14). После того как миниробот заберет детали из всех гнезд одного ряда, кассета передвигается на шаг между рядами, после чего ЗУ обслуживает следующий ряд гнезд.

Если длина хода горизонтального ползуна больше расстояния между рабочей позицией и самым отдаленным от нее гнездом, и не предъявляются особых требований по быстродействию, то для решения такой задачи на стойке миниробота устанавливается револьверный механизм перемены координат ЗУ. Этот механизм выполняется в виде барабана 3 с упорными штырями 2, число и длина которых соответствуют числу и расположению гнезд в ряду опорожняемой кассеты 1. Каждый раз в то время, пока ЗУ находится у рабочей позиции, барабан 3 перемещается на одно деление храповым механизмом и пневмоприводом 4, в результате чего ЗУ каждый раз меняет точку захвата.

Популярность ортогональных минироботов предопределила многообразие их комбинаций с загрузочными устройствами всех типов — бункерными, магазинными, кассетными.

Чаще всего минироботы М1 применяются в связке с вибробункером (М1-ВБ). ЗУ забирает детали непосредственно из накопителя вибробункера, где запас ориентированных деталей хранится под крышкой, а деталь, подлежащая захвату, находится на упоре. У этой связки есть одно ограничение: толщина устанавливаемых

деталей плоской формы должна быть не меньше 0,3 мм; более тонкие детали требуют особо тщательного изготовления накопителя вибробункеров.

Иногда в связку М1-ВБ включают виброток-накопитель с отдельным виброприводом (М1-ВЛ-ВБ). В ответственных случаях такой накопитель оснащают системой контроля уровня заполнения (фотоэлектрической, электроконтактной, вакуумной), которая включает (или отключает) вибробункер. Это обеспечивает максимальную сохранность покрытий устанавливаемых деталей и снимает проблему переполнения накопителя. Кроме того, связка М1-ВЛ-ВБ позволяет разрешить противоречие в требованиях к режимам виброперемещения на стадиях ориентирования и накопления деталей. При ориентировании обычно требуются более высокие скорости движения, чем при накоплении, что обеспечивается соответствующей регулировкой приводов вибробункера и вибротокта.

Связка М1-ВЛ-ВБ позволяет также сконцентрировать на одной загрузочной позиции выходы из нескольких вибробункеров, что обеспечивает возможность групповой установки деталей в собираемый механизм. Групповая установка необходима из-за взаимного перекрытия деталей в часах (например, в ангренаже их раздельная вертикальная установка часто невозможна).

В случаях, когда устанавливаемые детали требуют для своего окончательного (обычно углового) ориентирования дополнительной загрузочной позиции, используются двухпозиционные связки. В такую связку, кроме миниробота схемы М1 и вибробункера, входит механизм активного ориентирования (МАО), расположенный посередине между позицией захвата в вибробункере и сборочной позицией. Вертикальный модуль мини-

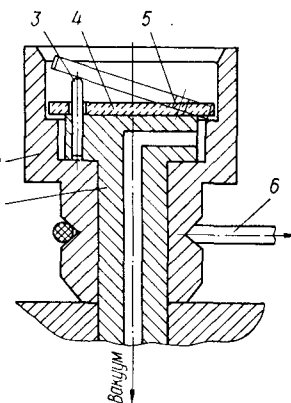


Рис. 11.15. Механизм активного ориентирования по угловой координате деталей формы плоских тел вращения

робота оснащается двумя ЗУ, из которых один переносит деталь из вибробункера в МАО, а другой — из МАО на сборочную позицию. Срабатывание МАО (доворот детали в нужное угловое положение) происходит во время обратного горизонтального хода миниробота.

Двухпозиционная связка используется, в частности, при сборке узла барабана — пружинного двигателя часов. На рис. 11.15 показано устройство МАО для деталей узла барабана. Оно состоит из неподвижной оси 1 с запрессованным в ее верхний торец штифтом 3, для фиксации углового положения ориентируемой детали 4, и вращающейся чашки 2. В шели между чашкой и верхним торцом оси создается вакуум, что обеспечивает надежное сцепление ориентируемой детали с вращающейся чашкой. При совмещении штифта 3 с окном (или пазом) 5 ориентируемой детали 4 она одевается на штифт и выравнивается на верхнем торце оси 1. После этого деталь практически не контактирует с вращающейся чашкой, чем обеспечена полная сохранность ее покрытия. Поскольку ориентирование должно произойти в промежутке времени между установкой детали в МАО и ее переносом на сборочную позицию, т. е. во время соответствующего перемещения горизонтального ползуна М1, привод вращения чашки осуществлен от этого ползуна через тросик 6.

Миниробот М1 сопрягается с разными загрузочными устройствами, из которых детали вынимаются вертикально вверх. В частности, это револьверно-пакетные магазины (РПМ), где детали — обычно плоские — складываются пакетами в револьверном барабане. В каждой шахте имеется опорный вкладыш, который по мере освобождения от деталей поднимается вверх, поддерживая их постоянный уровень.

Револьверно-пакетные механизмы применимы для деталей, конфигурация которых допускает пакетирование (в шахте или на оправке). Их более рационально располагать перед линией транспорта ТБМ, так как при этом удобнее

производить дозаправку или смену барабанов. Их использование ограничено возможной слипаемостью деталей между собой, которая может явиться следствием их замасленности или намагниченности. В последнем случае можно использовать электромагнитный распушитель, магнитопровод которого размещен в зоне захвата деталей.

Миниروبات М1 сопрягаются также с кассетными загрузчиками, когда детали поштучно разложены по гнездам специальных кассет. Гнезда выполняются в соответствии с формой деталей, что снимает необходимость их ориентирования.

Одномодульный миниробот с наклонным движением ЗУ (схема М2). Наклонное (под углом  $30^\circ$  к вертикали) движение ЗУ на загрузочную позицию вызвано тем, что подобное положение детали перед захватом часто позволяет упростить систему автоматической загрузки или сделать ее более надежной.

Например:

требуется доставить на позицию захвата из вибробункера одну относительно крупную деталь. Здесь детали подводят на позицию загрузки по лоткам, проще всего помощью наклонного гравитационного лотка;

требуется обеспечить бесперебойную загрузку тонких плоских деталей. Если установку этих деталей производить минироботом М1, то в соответствии с траекторией движения ЗУ их надо накапливать в горизонтальном положении. Чтобы детали при этом не наползали друг на друга, дорожку накопителя накрывают сверху крыш-

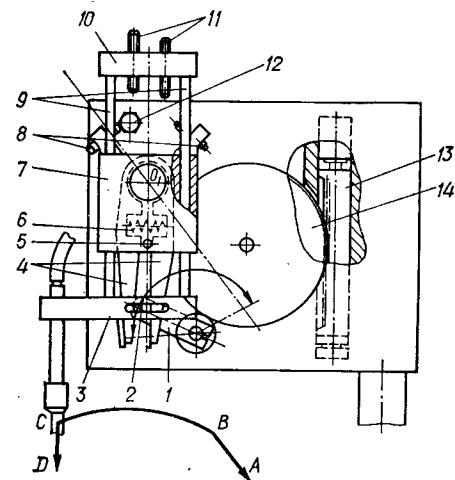


Рис. 11.16. Одномодульный миниробот с наклонным движением ЗУ на позицию захвата (схема М2)

кой. При этом, однако, нарушается направленное перемещение деталей под крышкой.

Тонкие детали при умеренных режимах вибрации можно надежно накапливать в один слой на лотке наклонного поперечного сечения с низким, равным толщине детали, удерживающим бортиком. Для совмещения траекторий движения деталей на наклонном лотке и ЗУ миниробота М1 последний должен быть оснащен управляемой поворотной координатой. В данном случае реализуется схема миниробота М2. Так как и в этом случае детали должны устанавливаться вертикально, ЗУ во время их переноса должно повернуться из наклонного в вертикальное положение, т. е. совершить качательное перемещение. В связи с этим миниروبات М2 являются маятниковыми.

Основой кинематики миниробота М2 (рис. 11.16) является механизм качающейся кулисы, приводимой совершающим маятниковое движение кривошипом 1. Выполненная в виде двух штоков 9, связанных с обоими концами поперечинами 10, кулиса скользит в качающемся корпусе 7 и шарнирно сочленена с пальцем 2 кривошипа. Со стороны кулисы это сочленение образовано пазом в нижней поперечине 3 и параллельными оси кулисы стенками губок 4, стянутых между собой пружиной 6 к ступице качающегося корпуса и укрепленному в нем ведущему пальцу 5.

На корпусе 7 имеются винты-упоры 8 регулировки его конечных угловых положений, взаимодействующие с неподвижной призматической стойкой 12. С той же стойкой взаимодействуют и размещенные в верхней поперечине винты-упоры 11, определяющие конечные положения движения кулисы относительно корпуса. Перед захватом или установкой детали корпус садится на один из упоров 11, после чего продолжающий двигаться кривошип пальцем 2 отжимает одну из губок 4, прижимая корпус 7 к призме 12 и, действуя на поперечину 3, сооб-

щает укрепленному на ней ЗУ прямолинейное перемещение. Варьируя продольный (вдоль оси кулисы) и поперечный (поперек той же оси) вылеты условного центра ЗУ относительно теоретической оси шарнирного сочленения, можно существенно менять длину и расположение траектории переноса деталей при неизменных координатах осей качания корпуса и кривошипа.

Привод кривошипа — пневматический, через зубчато-реечную передачу от поршня 13 через паразитную шестерню 14. Последняя введена для улучшения компоновки манипулятора с загрузочными устройствами. Качающийся корпус 7, а также кривошип 2 часто используются в качестве привода дополнительных механизмов подачи и ориентирования деталей.

Связки М2 со средствами подготовки объектов роботизации. Наклон позволяет использовать гравитацию для подачи широкого ассортимента деталей. Единственное ограничение связано с массой деталей, которая должна быть достаточной для их надежного соскальзывания в условиях максимально допустимой загрязненности.

Гравитационная передача позволяет просто увязывать миниروبات М2 не только со спирально-лотковыми виброулавливателями. Практически любые механические бункерные загрузочные устройства — дисковые, барабанные, с секторным или шибберным забросом, с крючковыми или гнездовыми захватными элементами — хорошо сопрягаются с минироботом схемы М2.

Это позволило создать на базе миниробота М2 ряд связок, включающих механизмы активного ориентирования деталей, подаваемых из загрузочной емкости поштучно. Из практики известно, что активное ориентирование удобнее осуществлять при поштучной подаче деталей, а не в потоке. Используемые в связках на базе М2 МАО различны по устройству и принципу действия, но обладают общим свойством: они работают в постоянном цикле, т. е. последовательность и характер срабатывания их исполнительных элементов, опознающих, положение и переориентирующих подаваемые детали, не зависят от положения, в котором деталь находилась до того, как попала в МАО. Благодаря этому упрощается привод и управление связкой в целом.

Миниробот М2 также сопрягается с загрузочной решетчатой кассетой. Такая кассета представляет собой многоярусную этажерку, на полках которой поштучно находятся детали (например, циферблаты часов, фиксируемые двумя сквозными штырями). Стенка удерживает находящиеся на полках этажерки циферблаты до тех пор, пока полка не окажется на уровне выходного окна, после чего циферблат соскальзывает на упор, откуда его в соответствующий момент заберет вакуумное ЗУ миниробота. Шаговая подача кассет по трубе магазина вниз осуществляется сверху вниз анкерным перепускателем, взаимодействующим с наружными впадинами на кассете. По количеству и шагу впадины соответствуют полкам кассеты.

Сопряжение миниробота М2 с гравитационной подачей деталей позволило автоматизировать загрузку деталей при окончательной сборке прецизионных изделий. Наиболее ответственные детали и узлы таких изделий после изготовления и промывки обычно раскладывают поштучно в гнездах так называемых тарных дощечек (тар), представляющих собой прямоугольные кассеты, отличающиеся от специализированных тем, что их гнезда по форме и размерам не соответствуют раскладываемым в них деталям. Это — круглые или прямоугольные углубления, где можно поштучно, без ориентации, разложить любые детали. Разложенные в гнездах детали перед автоматической сборкой вытряхивают в начальные емкости бункеров. Здесь миниробот М2 сопрягается с тарно-пакетным загрузчиком (рис. 11.17). Пакет тар 6 с разложенными в них деталями 1 накрывается сверху пустой тарой, переворачивается и вставляется в направляющие 7 приемного магазина 5, смонтированного на наклонной доске.

При работе пустая нижняя тара 10 один раз в  $N$  циклов ( $N$  — число гнезд в одном ряду тары) сдвигается на один шаг  $t$  между рядами, выпуская на разделенную перегородками наклонную плоскость доски  $N$  деталей из гнезд открывшегося ряда. Эти детали соскальзывают вниз к механизму поштучной выдачи, выполненному в виде валика 3 с  $N$  кольцами 4, на которых имеются лыски 2. Валик приводится храповым механизмом (число зубьев храпового колеса равно  $N$ ), срабатывающим один раз в цикл. Кольца 4 на валике укреплены с угловым смещением лысок, благодаря чему каждый цикл в нижнюю часть доски поступает

только та деталь, которая соскользнула в просвет между плоскостями доски и повернувшейся к нему лыски.

Периодически сдвигаемая вверх нижняя тара играет роль задвижки, последовательно освобождающей все ряды гнезд лежащей на ней тары. В конечном итоге тара-заводка 10 выталкивается в выходной магазин 9, где опорожненные тары автоматически штабелируются, благодаря изгибу опорной плоскости доски в зоне этого магазина. Движение тара-заводки сообщается собачкой 11, толкающей ее за перегородки между гнездами. Ход собачки несколько больше  $t$ , благодаря чему после опорожнения последнего ряда тара сразу же оказывается в выходном магазине, а на ее место опускается следующая опустевшая тара, чем обеспечивается бесперебойность выдачи деталей.

Пакет тар в приемном магазине накрыт грузом 8. Масса этого груза сосредоточена в верхней части пакета, благодаря чему обеспечено плотное прилегание опорожняемой тары к тара-заводке после того, как последняя будет выдвинута

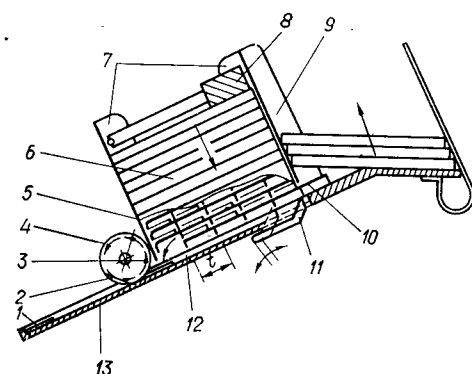
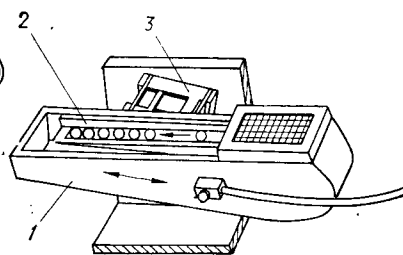


Рис. 11.17. Схема тарно-пакетного загрузчика на базе миниробота М2

Рис. 11.18. Пневмовибробункер



более чем на половину своей длины. При отсутствии этого груза лежащие в последних рядах опорожняемой тары детали могли бы соскользнуть и смешаться между собой в клиновом просвете, который бы образовался после наклона пакета тар на ребре тары-заводки. Такая связка (М2-ТПЗ) представляет собой одну из самых перспективных исполнительных систем для сборки малогабаритных прецизионных изделий в приборостроении.

Применительно к мелким деталям широкие возможности имеют связки М2 с пневмовибробункерами (ПВБ). Последние очень удобны для загрузки широкого ассортимента мелких деталей (именно в связке с минироботом схемы М2). Пневмовибробункер (рис. 11.18) представляет собой укрепленный на линейном виброприводе 3 коробчатый контейнер 1, в верхней части которого укреплен лоток 2, выполненный в соответствия с формой и методом ориентирования подаваемых деталей. Подача насыпанных в контейнер деталей вверх на лоток осуществляется струей сжатого воздуха по дуговой беговой дорожке полукруглого поперечного сечения. На лоток детали попадают через состоящий из двух наклонных экранов и сетки аэросепаратор, который изолирует лоток от струи сжатого воздуха. При этом, чтобы успеть сориентироваться, детали на лотке должны двигаться только под действием вибрации. Дуговое направление и полукруглое сечение беговой дорожки сводят к минимуму расход сжатого воздуха и шум, создаваемый при его истечении из сопла.

Линейный вибропривод ПВБ выполнен по схеме прямоугольного вибролотка: нужное направление колебаний задается здесь не наклоном пружин подвески, а поворотом всего вибролотка вокруг горизонтальной оси. Пневмовибробункер увязывается с любыми минироботами. В связках с М2 ПВБ располагают как параллельно линии транспорта ТБМ, так и перпендикулярно к ней. Захват деталей можно производить непосредственно с лотка, несущая поверхность которого наклонена под углом  $30^\circ$  к горизонту, или из промежуточного механизма, выполняющего функции накопления пакета плоских деталей, поштучного отде-

ления и т. п. Эти механизмы приводятся в движение от наружных подвижных звеньев миниробота М2.

Подобная по компоновке связка используется и для установки плоского рычага, схема ориентирования и накопления которого в ПВБ показана на рис. 11.19. После заброса на лоток 1 эти рычаги движутся в четырех различных положениях I—IV. Лоток 1 заканчивается крутым спуском 6 с уступом 5 на удерживающей накладке и сквозным фигурным окном 2 в основной поверхности лотка. На уступе задерживаются детали, пришедшие к нему в положении I, т. е. в единственном положении, когда они имеют возможность зацепиться за уступ своим отогнутым острым концом.

Опираясь этим концом на уступ, детали в положении I поворачиваются и перекладываются на полку 3, ведущую к накопителю 4, где они складываются ленточкой. Спуск 6 выполняется несколько короче детали, благодаря чему находящаяся на уступе деталь переворачивается под напором следующих за ней деталей.

Применение связки М2-ПВБ позволило автоматизировать установку деталей с упругими элементами (например, в ремонтуре, в календарном устройстве наручных часов). Несмотря на разнообразие форм и размеров,

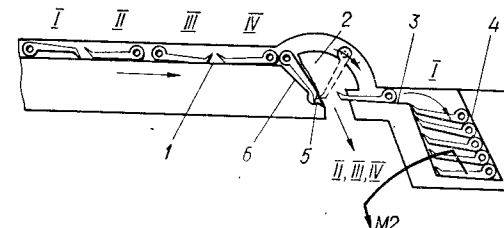


Рис. 11.19. Связка М2-ПВБ для деталей ремонтуре часов «Слава»

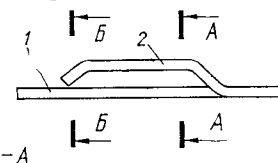
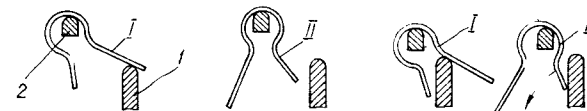


Рис. 11.20. Схема ориентирования пружины в ПВБ



этим деталям свойственна общая черта: повышенная сгибаемость в начале.

Один из типичных примеров обслуживаемых упругих деталей — неравноплечая крючковая пружина (рис. 11.20). Кроме миниробота М2 и ПВБ в данную связку входит промежуточная поворотная рука с горизонтальной осью вращения. Пружины ориентируются на выполненных заодно с ножевой пластиной 1 штырях 2, слегка отведенных в своей средней части в сторону от пластины. Благодаря этому пружины в положении II срысываются коротким плечом с ножа и, дойдя до конца штыря, падают на дно контейнера; в положении I пружины вновь возвращаются на нож. Такая процедура повторяется несколько раз, что исключает погрешности ориентирования.

Ориентированные пружины останавливаются на упоре, образованном уступом в конце ножа, и поштучно забираются отсюда пинцетом промежуточной руки. Пинцет состоит из двух электрически изолированных лапок, цепь между которыми замыкает переносимая пружина, сигнализируя о готовности миниробота к работе.

Привод поворота промежуточной руки осуществляется от качающегося корпуса кулисы. Так как поворот корпуса кулисы оканчивается раньше движения ЗУ, к моменту прихода последнего на позицию захвата там уже будут находиться пинцет с пружиной.

Аналогичная связка М2-ПВБ используется и для установки тонколистовых фигурных пластин 2 (рис. 11.21). Подобные детали часто имеют упругий отросок 3, плоскость которого слегка отогнута от плоскости основной части. Повы-

шенная сцепляемость этих деталей не дает возможности использовать для их ориентирования обычные трафаретные устройства, а малая толщина (до 0,2 мм) упругого отрезка 3 не позволяет выстраивать детали в очередь друг за другом в лотке-накопителе. Задача решается с помощью встроенного в ПВБ трафаретного качающегося гнезда 1. В это гнездо попадают только правильно ориентированные детали, которые накапливаются в нем пакетом. Перед приходом ЗУ на загрузочную позицию гнездо поворачивается в наклонное (30° к вертикали) положение, и находящиеся на нем, но не запавшие в него, детали сбрасываются на дно ПВБ. Захватное устройство забирает верхнюю деталь и уносит ее на сборочную позицию, а гнездо возвращается в исходное положение.

Кроме качающегося трафаретного гнезда ПВБ в данном случае оснащен лотковой системой предварительного активного ориентирования. После аэродинамического подъема детали проходят вначале через продольный, а затем через поперечный опрокидыватели, от которых не требуется особой четкости ориентирования: они должны лишь повысить вероятность подхода деталей к гнезду в нужном положении. Для этого ход подпружиненных элементов ЗУ (присоски, ловители) должен быть рассчитан на перепад уровня захвата, равный глубине гнезда. Для взведения упругого отрезка устанавливаемой детали в рабочее положение ЗУ оснащается специаль-

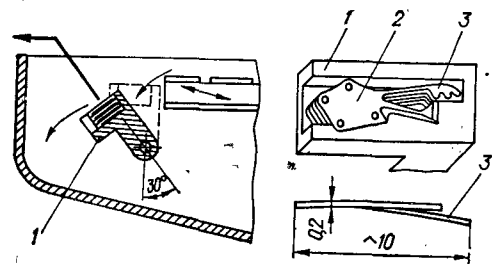


Рис. 11.21. Схема ориентирования и накопления фасонных тонколистовых пластин в качающемся трафаретном гнезде-накопителе ПВБ

ной лапкой с миниатюрным пневмоприводом, срабатывающем после подхода ЗУ к собираемому изделию. Как и в предыдущем случае, привод наклона гнезда осуществлен от корпуса качающейся кулисы, что обеспечивает его поворот к ЗУ до его подхода к загрузочной позиции.

Связка М2-ПВБ является универсальным и надежным средством загрузки и установки плоских деталей практически любой формы.

Минибот М2 используется также в связке с другим загрузочным оборудованием. Таким оборудованием является и лотково-бункерный набрасыватель (ЛБН) — автоматическое загрузочное устройство, в котором подаваемые детали периодически набрасываются на оснащенный системой ориентирования вибрлоток с помощью специального манипулятора, захватывающего их поштучно или небольшими порциями из бункерной емкости. Главная цель, которая преследовалась при разработке связки М2-ЛБН, — свести к максимуму сохранность и минимум загрязненность легкоповреждаемых деталей и узлов часового механизма. Достигается это, во-первых, тем, что основной запас деталей хранится в емкости, а не находится в состоянии непрерывного движения — перемешивания (как в бункерных автозагрузчиках). Требуемая производительность достигается в ЛБН активизацией процесса ориентирования деталей, а не за счет интенсификации режимов транспортирования.

Для повышения сохранности подаваемых деталей необходимо:

- отделить емкость для деталей от вибрлотка, т. е. выполнить ее невибрирующей и укрепить неподвижно, или обеспечить возможность легкого периодического встряхивания для разрушения пучков сцепившихся в ней деталей;
- заменить систему аэродинамического забрасывания деталей на лоток канн-либо упрощенным манипулятором, оснащенным, например, мягкой вакуумной присоской для поштучно-порционного захвата деталей из навала сверху, подъема и сбрасывания их на входной участок вибрлотка.

На основе этих требований (условий) разработаны две связки М2-ЛБН, одна из которых выполнена с независимым набрасывателем (рис. 11.22). Кроме минибота 1 здесь имеются вибрлоток 2 на линейном виброприводе 14, контейнер 13 для устанавливаемых деталей, покачиваемый на неподвижной оси 12, и манипулятор-набрасыватель, траектория присосок 3 которого показана стрел-

кой А. В основе кинематики набрасывателя — ременная передача 8, протянутая через ролики 6 и ведущий шкив 9. Последний через зубчато-реечную передачу связан с пневмоприводом 10, работающим в колебательном режиме с частотой 0,5—1 Гц. На ремне укреплены пальцы 5, на которых смонтированы рычажные державки 4 вакуумных присосок 3, выполненных из пластмассовых трубок стержней шариковых авторучек. Вакуум в присосках обеспечивается торцевым золотником, установленным на валу ведущего шкива 9, чем достигается синхронность создания и снятия вакуума с движением присосок.

Ременной механизм сообщает державкам плоско-параллельное перемещение, т. е. все точки сидящего на пальцах 5 звена описывают одинаковые траектории. Точки закрепления пальцев 5 выбраны таким образом, чтобы при набегании на ролики 6 они описывали дуги, в конце движения по которым присоска 3 оказывается над начальным участком вибрлотка. Здесь вакуум в присосках снимается, и поднятые детали сбрасываются на лоток.

На обратном ходу присоска вертикально опускается в контейнер 13 и, будучи свободно вставлена в отверстие державки 4, останавливается на первой лежащей сверху детали. В конце обратного хода в присосках вновь создается вакуум, с помощью которого остановившаяся присоска деталь увлекается вверх в следующем цикле набрасывания.

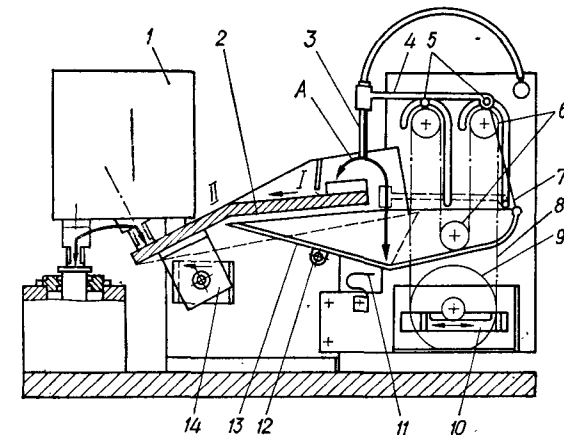


Рис. 11.22. Связка М2 с независимым лотково-бункерным набрасывателем

Данная связка предназначена для установки узлов триб-колесо. Ажурность колес приводит к повышенной сцепляемости узлов триб-колесо в навале, из-за чего присоска иногда уходит из контейнера пустой. Наиболее эффективным средством борьбы со сцепляемостью является периодическое встряхивание контейнера. Для этого контейнер свободно одет на ось 12, а гибкий тросик 7 связывает его с одним из пальцев 5. Благодаря этому в конце хода набрасывателя вверх правая (на рисунке) часть контейнера подбрасывается вверх, а в начале хода вниз контейнер падает на рессору 11, совершая на ней несколько затухающих колебаний. Таким образом, сцепляемость деталей ликвидируется.

Показанный на рис. 11.23 вибрлоток состоит из двух участков — малого I и большого II наклонов. На участке I осуществляется предварительное активное и пассивное окончательное ориентирование узлов триб-колесо теми или иными лотковыми средствами. Среди других средств здесь используется V-образный лоток, в котором узлы ориентируются длинной частью триба вверх.

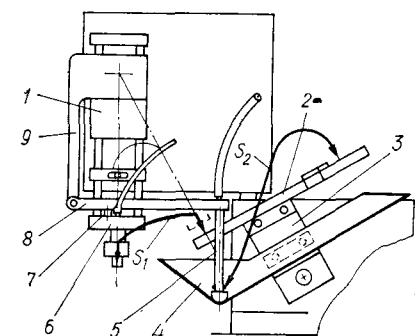
На участке II происходит накопление и поштучное отделение узлов триб-колесо перед их захватом миниботом. Поскольку колеса наручных часов имеют толщину 0,15...0,2 мм, исключить их наложение друг на друга в накопителе очень сложно. Поэтому в накопителе колеса узлов перекрывают друг друга, а перед захватом весь ряд находящихся здесь узлов сдвигается назад и вверх, открывая оставшийся на месте первый узел, который и уносится отсюда ЗУ минибота.

Узлы сдвигаются специальным механизмом, содержащим минибот (модель СГ 406А) для установки секундного и анкерного колес часов «Слава». Механизм приводится от кривошипа минибота М2; вместе с узлами триб-колесо отводится назад крышка накопителя, благодаря чему узлы в нем практически никогда не застревают.

На стыке участков I и II отсортировываются взаимно переплетенные узлы триб-колесо.

В течение ряда лет склонность узлов триб-колесо к взаимному переплетению (как следствие ажурности колес) оставалась одним из главных препятствий при автоматизации сборки ангренажа наручных часов. Только в данной связке М2-ЛБН было получено решение: пересекающий стык между участками полового и крутого наклонных одиночный узел успевает «нырнуть» под размещенный здесь козырек, а переплетенная или перекрытая группа, являющаяся в сумме более длинным телом, «нырнуть» не успевает и оказывается над козырьком, с которого она сбрасывается обратно в контейнер ЛБН.

Одно из главных достоинств связки М2-ЛБН — их компактность. Другой вид связки М2-ЛБН характерен тем, что набрасыватель кинематически встроен в миниробот и работает синхронно с ним (рис. 11.23). Здесь набрасыватель выполнен в виде приставки к подвижной части миниробота М2: на качающемся корпусе подвешенной державкой 8 присоски 5. Державка 8 опирается на кронштейн 6 ЗУ через упор 7.



При движении ЗУ по траектории  $S_1$  присоска 5 движется по траектории  $S_2$ , связывающей дно неподвижного корыта 4 с приемной площадкой лотковой системы, расположенной на наклонной колеблющейся плите 2. Последняя укрепленна на линейном виброприводе 3, колебания которого направлены горизонтально. Таким образом, в то время как ЗУ улавливает деталь в собираемое изделие,

Рис. 11.23. Миниробот М2 с приставкой-набрасывателем

присоска 5 набрасывателя находится в корыте 4, опираясь сверху на находящиеся в нем детали. При движении ЗУ на загрузочную позицию присоска переносит присосавшиеся к ней детали в верхнюю часть плиты 2. Отсюда поднятые детали начнут двигаться по зигзагообразной лотковой системе (путь, во время которого они тем или иным образом будут сориентированы и выстроятся в очередь на нижней накопительной ползунке лотковой системы).

Лотковая система представляет собой пассивное ориентирующее устройство — селектор, дополненный поворотным лотковым устройством. Таким образом, отсортированные детали можно перевернуть на нужную сторону и вернуть на следующую полку лотковой системы. Тем самым процесс ориентирования существенно активизируется. В лотковой системе отсутствуют такие явления, как переполнения или закупорка лотков: лишние детали легко сбрасываются в корыто.

Так как в данной связке набрасыватель работает синхронно с ЗУ, необходимо обеспечить бесперебойность подачи деталей. Наряду с активизацией процесса ориентирования большое значение для этого имеет надежность захвата деталей из корыта. Применительно к небольшим плоским деталям с односторонним выступом, для которых предназначена рассматриваемая связка, хорошо себя зарекомендовали присоски в виде мягкого сферического колпачка с отверстием.

## 7. ДВУХЗВЕННЫЙ МИНИРОБОТ

Двухзвенные минироботы схемы М3 содержат два исполнительных подвижных звена — оснащенный ЗУ 1 вертикальный ползун 2 (рис. 11.24) и вспомогательный поворотный питатель 10 для горизонтального переноса деталей из загрузочной емкости на линию действия ЗУ. Соответственно здесь имеются два пневматических модуля перемещений, причем модуль 3 вспомогательного питателя — поворотный, с зубчато-реечной передачей на вертикальный вал 6.

После выноса детали под ЗУ оно опускается на ход  $H_2$  и захватывает детали из питателя, затем ЗУ поднимается, питатель отводится к загрузочной емкости, после чего ЗУ вновь опускается — теперь глубже (ход  $H_1$ ) — на сборочную позицию.

Передача движения от пневмопривода на вертикальный ползун 2 — прямая. Движение поворотному питателю передается зубчато-реечной передачей от двух поршней-реек 5. Такая конструкция позволила значительно уменьшить размеры поворотного модуля, и, следовательно, всего миниробота.

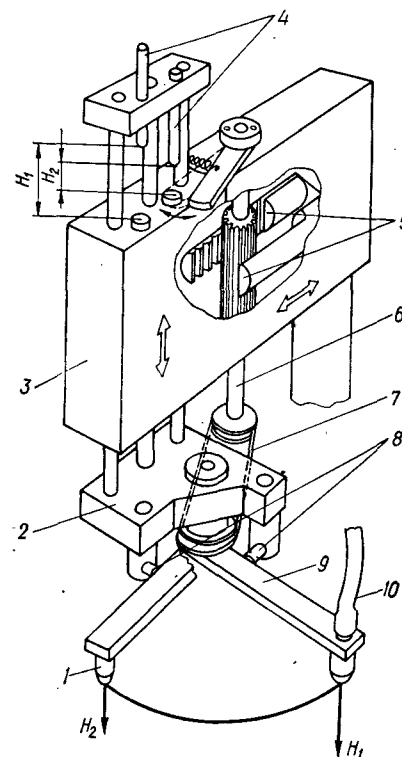
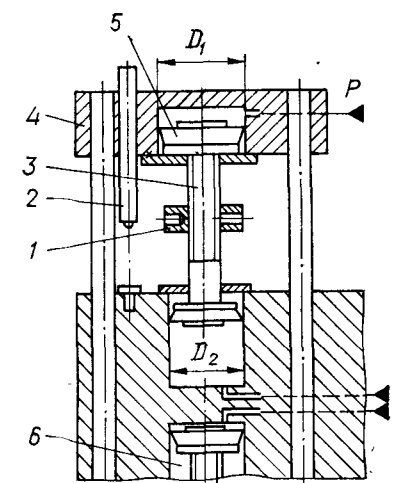


Рис. 11.24. Кинематическая схема двухзвенного миниробота М3 (поворотно-осевая модификация)

Рис. 11.25. Дополнительный пневмопривод вертикального модуля миниробота М3 ( $D_1 > D_2$ )



Позиционирование ЗУ в положении, когда оно забирает деталь из вспомогательного питателя, производится с помощью посаженной на вал поворотного питателя чеки 9, встречающей упор 8 вертикального ползуна. Во время установочного хода ЗУ чека 9 вместе с питателем выведена из-под упора, и вертикальный ползун опускается на глубину, определяемую регулировкой упора 4.

По сравнению с минироботами М1 и М2 схема М3 имеет следующие отличительные особенности:

М3 содержит два исполнительных органа — ЗУ и вспомогательный питатель. Здесь можно провести аналогию с человеком, вернее, с его правой и левой рукой, между которыми существует известное разделение труда. В данном случае ЗУ, которое берет и устанавливает деталь в собираемое изделие, можно сравнить с правой рукой, вспомогательный питатель — с левой;

оба модуля перемещений укреплены на неподвижной стойке, т. е. горизонтальное переносное перемещение вертикального модуля отсутствует.

Эти отличия дают схеме М3 два преимущества:

максимальную точность позиционирования ЗУ, так как между ним и стойкой всего одна кинематическая пара;

повышенное (по сравнению со схемой М1) быстродействие, что объясняется отсутствием длинноходового горизонтального переноса пассивного блока вер-

тикального модуля и его оснастки, например винтоверта. Каждый модуль нагружен только своим исполнительным органом, причем оснастка вспомогательного питателя малоинерционна. Некоторое удлинение хода ЗУ на установку по сравнению с относительно коротким ходом на захват определяется высотой оснастки вспомогательного питателя, которая обычно незначительна. Реализовать последнее гораздо проще при механическом (кулачковом) приводе миниробота, чем на пневматике.

Как и в случаях М1, М2, миниробот М3 используется в связке. Удачная конструкция связки М3 с пакетно-шиберным магазином (ПШМ): вспомогательный питатель оснащается шибером, поштучно выдвигающим и подносящим под ЗУ детали из магазина, где они сложены пакетом. Бункерная загрузка относительно массивных деталей может привести к нежелательным повреждениям их покрытий, к повышению загрязненности собираемого изделия. Эти причины предопределили широкое использование связки М3-ПШМ на операции установочных мостов ангренажа, состоящей из двух сопряжений: первое — сопряжение опорных отверстий моста с цапфами вращающихся звеньев ангренажа. Это сопряжение в наиболее ответственных случаях выполняется двухэтапным вибромагнитным методом (рассмотренным ранее в данной главе); второе — сопряжение моста с платиной, т. е.

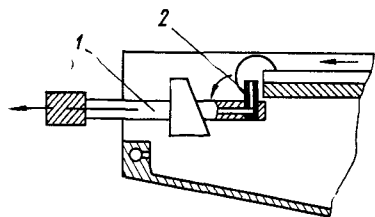


Рис. 11.26. Связка М3 ПВБ для группового завинчивания и безнакопительной загрузки винтов в гнездо вспомогательного питателя

посадка на точные базовые штифты. Именно при этом сопряжении особенно важна точность позиционирования ЗУ.

Для реализации двухэтапного вибромагнитного метода установки вертикальный модуль миниробота М3 модифицируется (рис. 11.52): его верхняя поперечина 4 связывается со штоком 3 вертикального поршня через дополнительный пневмопривод 5 большей мощности ( $D_1 > D_2$ ). На первом этапе установки этот пневмопривод включен, и вертикальный ползун с ЗУ опускается на уровень, определяемый регулировкой гайки 1. В это время происходит центрирование цапф узлов триб-колесо относительно камневых опор устанавливаемого моста. Через некоторое время пневмопривод 5 отключается, и под действием нижнего пневмопривода 6 происходит второй этап — окончательная установка моста на платину собираемого механизма. При этом шток 3 вертикального поршня сдвигается относительно поперечины 4, которая опускается на уровень, определяемый регулировкой упора 2.

При одновременном завинчивании двух-трех винтов на одной позиции не только повышается производительность сборки, но и исключается возможность перекоса моста. Конструкция многшпиндельного винтоверта для группового завинчивания разработана специально под «привязку» к минироботу М3, на корпусе которого укреплен приводной электродвигатель, связанный с винтовертом ременной передачей. Групповое завинчивание также позволяет осуществлять автоматическую загрузку винтов, однако при этом возникает ряд трудностей, существенным образом сказывающихся на надежности загрузочных устройств. Это объясняется прежде всего малыми размерами часовых винтов, а также засоренностью партий поступающих на сборку винтов винтами других наименований, браком и разного рода посторонними предметами.

С учетом этих трудностей разработан так называемый безнакопительный метод загрузки часовых винтов (рис. 11.26). В ПВБ, где винты потоками движутся по канавкам U-образного сечения, их сбрасывают на приемное гнездо — вакуумную втулку 2, укрепленную на поворотном плече 1 вспомогательного питателя миниробота М3.

Через несколько десятых долей секунды после того, как питатель вошел в ПВБ и последний начал работать, все гнезда заполняются запавшими в них винтами. Одним из мероприятий, повышающих вероятность попадания винтов в гнезда, является подключение последних к вакуумной системе. Вакуум может

присосать к гнезду винт в любом положении, но благодаря пульсации, т. е. периодическим отключениям вакуумной системы, винты, не попавшие своей резьбовой ножкой в гнездо, сметаются с него потоком следующих винтов. После заполнения винтами питатель поворачивается под многшпиндельный винтоверт, присоски которого забирают винты из его гнезд.

Надежность безнакопительной загрузки оказалась практически не зависящей от размеров, формы и, главное, качества изготовления часовых винтов, поэтому данная система превосходит обычные, когда винты ориентируют и накапливают в профилированных лотках-накопителях. О надежности миниробота-винтоверта СГ 405А свидетельствует его широкое внедрение практически на всех отечественных предприятиях, выпускающих наручные часы.

Кинематика миниробота М3 позволяет сравнительно просто модифицировать его в поворотно-осевую руку (см. рис. 11.24): на вертикальном ползуне 2 крепится кронштейн с опорой вращения поворотного модуля 3 руки, движение которого через приводной ремень 7 сообщается от вала 6 вспомогательного питателя. Циклограмма миниробота при такой модификации не изменяется, отпадает лишь совмещение времени установочного и переносного движений ЗУ.

В отличие от большинства известных поворотно-осевых рук, у которых вертикальный вал и привод расположены снизу, в данной модификации плечо руки находится под приводом, что является преимуществом. В частности, можно расположить загрузочное устройство в непосредственной близости от рабочей позиции, что, в свою очередь, позволяет резко сократить вылет ЗУ относительно оси поворота и, следовательно, момент инерции подвижной части миниробота.

Поворотно-осевая модификация М3 используется для автоматической установки группы деталей завод-

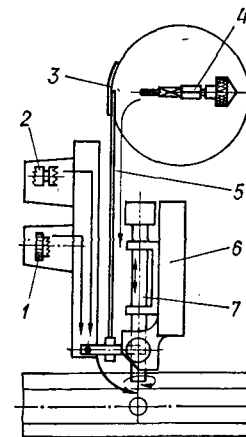


Рис. 11.27. Связка М3 ПВБ-ВБ для установки группы деталей заводного ключа

ного ключа: в сквозное Т-образное окно плиты опускают две детали (кулачковую муфту и заводной триб) и пронизывают их ключом. При этом ключ вставляется снаружи через радиальное отверстие плиты с поворотом вокруг его оси, так как с кулачковой муфтой он сопрягается по квадрату.

Плечо поворотной руки оснащено комбинированным ЗУ с вакуумной присоской для муфты и триба и радиально-подвижным механическим пинцетом для ключа. На рис. 11.27 показана схема планировки миниробота для данной операции: загрузка муфты 2 и триба 1 — из двухсекционного ПВБ (с коническими емкостями), ключа 4 — из вибробункера, расположенного за корпусом миниробота 6. Подвод ключей на позицию загрузки — по отводящему лотку-накопителю 5, подвешенному к основанию вибропривода на гибкой пластине 3. Для вставки и прокручивания ключа имеется специальный горизонтальный шпindel 7.

Если детали данной группы (муфта, триб и ключ) устанавливать отдельно, на следующих друг за другом позициях, то в каждое гнездо транспортной кассеты нужно положить под собираемый механизм по специальному вкладышу, чтобы удерживать в сквозном Т-образном окне плиты предварительно уложенные туда муфты и триб, сквозь которые должен быть продет заводной вал часов. Эти вкладыши проходят по своему участку сборки ремонтгара и делают невозможной групповую перекачку платин. При одновременной установке деталей на одной позиции вкладыши не нужны, чем существенно упрощается система транспортирования собираемых часовых механизмов по всему сборочному комплексу.

Данная операция (с нее обычно начинается сборка часового механизма) стала сегодня одной из самых производительных. В значительной мере это объясняется надежностью и производительностью выполняющего ее миниробота.

## ПУТИ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Промышленное использование достижений развития робототехники можно рассматривать в аспекте решения двух задач: создание базовых моделей и модификации ПР, объединенных в оптимальное по функциональным и технико-экономическим показателям отраслевые типоразмерные ряды; построение на этой основе переналаживаемых робототехнических систем различного назначения, удовлетворяющих потребностям конкретных отраслей. Такие системы являются открытыми, развивающимися, гибкими и универсальными. Свойство открытости предусматривает их расширение по горизонтали за счет включения новых функциональных элементов и по вертикали за счет наращивания уровней управления более высокого ранга при интеграции отдельных подсистем — технологических и обслуживающих.

Высокая гибкость РТС обеспечивается резким повышением производительности труда на основе автоматизации и комплексирования всех средств производства, а также конструкторской и технологической его подготовки; связью всех единиц автоматического технологического оборудования в единый производственный комплекс с помощью автоматизированных транспортно-складских систем и роботизированных участков комплектования; широким использованием микропроцессоров и приближением мини- и микро-ЭВМ к видеотерминалам к рабочим местам всего обслуживающего персонала; унифицированным модульным составом всех компонентов гибких робототехнических систем; принудительной синхронизацией работы всех компонентов робототехнической системы от ЭВМ; программируемостью технологии, управления и конфигурации всего комплекса технических средств РТС.

Возможность формирования из ограниченного числа компонентов с рационально выбранными функциями различных по назначению РТС, легко переналаживаемых за счет перепрограммирования, диспетчирования материальных потоков, замены или добавления новых элементов обеспечивают универсальность робототехнических систем.

В качестве основного принципа организации гибких РТС целесообразно применять принцип модульности. Использование такого принципа позволяет из ограниченного числа унифицированных модулей получать необходимое число различающихся по структуре и функциональным возможностям робототехнических систем. В таких системах ПР выполняют функции загрузки и выгрузки технологического оборудования, манипулирования объектами производства с целью их переориентирования, идентификации класса и положения изделий, а при оснащении роботов контрольно-измерительными средствами — межоперационного контроля полуфабрикатов и аттестации готовой продукции. Наконец, при разработке гибких автоматизированных производств работы используются в качестве подвижных транспортных средств с автономными источниками питания, локальными бортовыми системами управления и навигации.

Создание гибких робототехнических систем носит межотраслевой характер, и успешное решение задачи широкого внедрения РТС требует согласования усилий специалистов разного профиля по оптимальному использованию достижений в области технологии, микроэлектроники, вычислительной, информационной техники и робототехники.

В проблеме создания роботизированных производств наряду с освоением новых технологий и оборудования, основанных на применении роботов, необходимо выделить задачу роботизации существующих производств, что позволит решить задачу повышения эффективности общественного производства за счет его интенсификации. Решение этой задачи создает возможности комплексной автоматизации (в том числе мелкосерийного и индивидуального производства) с

обеспечением быстрой сменяемости вида выпускаемой продукции, упрощения и ускорения процесса автоматизации и модернизации существующих и морально устаревших производств, высвобождения и более рационального использования трудовых ресурсов и улучшения условий и характера труда.

Сегодня в нашей стране, как и в других странах, основное применение роботы находят в машиностроении для замены рабочих на отдельных операциях по обслуживанию станков, кузнечно-прессового и другого оборудования, а также при выполнении некоторых самостоятельных технологических операций окраски, сварки, сборки. Вместе с тем, уже имеются комплексно-автоматизированные с помощью роботов участки, главным образом механообработки, штамповки, точечной и дуговой сварки механосборочные и монтажные. Разрабатываются проекты, а в ряде случаев, выполняются пуско-наладочные работы по запуску гибких автоматизированных производств изделий приборо- и машиностроительного профиля, полностью обслуживаемые иерархией роботов.

Дальнейшее развитие и комплексное использование промышленной робототехники зависит от состояния ее элементной базы. Комплексность РТС обусловила разнообразие применяемых в них технических средств, которые могут быть разбиты на четыре класса: исполнительные, управляющие, информационные и вычислительные. Поэтому для эффективной совместной работы частей этого комплекса важна разработка хорошо согласованных языков обмена информацией и соответствующих компактных согласующих элементов, отвечающих необходимому качеству обмена сигналами между компонентами РТС. По-прежнему, основными требованиями к ПР, непосредственно определяемыми возможностями элементной базы, являются требования по надежности и ресурсу, быстродействию, точности, массо-габаритным характеристикам и стоимости.

Повышенные требования к надежности и ресурсу ПР определяют их роль в создаваемых на их базе гибких РТС как средства замены рабочих. Роботы должны обладать результирующей надежностью (с учетом резервирования), не уступающей надежности совместно работающего основного технологического оборудования. Это требует для ПР увеличения среднего времени наработки на отказ до десятков тысяч часов, что на порядок выше достигнутого в настоящее время уровня. В этом плане развитие промышленной робототехники должно быть направлено, с одной стороны, на использование наиболее простых конструктивных и системотехнических решений, а с другой — на использование модульного построения из унифицированных типовых элементов для обеспечения быстрой замены вышедших из строя компонентов.

Повышение быстродействия ПР для большинства областей их применения связано с увеличением производительности труда на соответствующих операциях. Между тем, пока еще по быстродействию роботы уступают человеку, особенно на операциях со сложным характером движения транспортируемого и манипулируемого объекта (например, сборочные операции). Поэтому одной из основных задач промышленной робототехники является создание разгруженных (уравновешенных) манипуляционных систем, у которых повышение быстродействия является следствием снижения влияния инерционных факторов. Этому могут способствовать и новые тихоходные высокомоментные электродвигатели постоянного тока, и линейные электродвигатели постоянного и переменного тока, освоение выпуска которых и их широкое использование в робототехнике позволит создавать безредукторные передачи с хорошими динамическими характеристиками. Сочетание использования таких технических решений для манипуляционных систем с более широким внедрением микропроцессорной вычислительной техники в управляющие системы ПР позволит существенно (на порядок) повысить быстродействие последних.

Требования по точности и быстродействию, как известно, противоречивы. Тем не менее, повышение точности позиционирования роботов и отработки траекторий при любых пространственных перемещениях рабочих органов ПР во всем объеме рабочей зоны для сборочно-монтажных и сварочных работ является одной из первоочередных задач промышленной робототехники. Пути ее реализации заключаются в совершенствовании исполнительных систем ПР, и в частности, в форсировании работ по созданию следящих и импульсных пневмоприводов, совершенствованию систем отсчета координат для электро- и гидроприводов. Особое место занимает задача расширения области применения и повы-

шения эффективности использования позиционных разомкнутых ротационных и линейных пневмоприводов, обладающих высоким быстродействием, достаточной для практического использования в сборочных производствах точностью и легко сопрягаемых со стандартными управляющими устройствами на базе микропроцессорной техники.

В связи с необходимостью размещения ПР на производственных участках (в том числе и в уже существующих цехах) в непосредственной близости от основного технологического оборудования, первые должны занимать не больше места, чем высвобождаемый ими технический персонал. Поэтому особые требования предъявляются к массогабаритным характеристикам роботов. Эта задача может быть решена при использовании рациональных компоновок как манипуляционных систем роботов, так технологических планировок РТС. В частности, с учетом большего (по отношению к другим структурам ПР) объема рабочей зоны преимущество может быть отдано антропоморфным структурам ПР, работающим в сферической системе координат; кроме того, более широкое использование принципа агрегатирования также является одним из вариантов решения задачи, так как в этом случае представляется возможным конструктивное отделение от остальных частей ПР его манипуляторов для установки их непосредственно на технологическое оборудование или размещения над обслуживаемым оборудованием. Наконец, сокращение производственных площадей, занимаемых ПР, может быть обеспечено повышенным технологической и функциональной универсальности ПР, когда вместо двух (и более) роботов используется один двурукий (многорукий) с двумя (и более) захватными устройствами. Последнее также проще реализуется в модульных компоновках ПР.

Наряду с перечисленными требованиями, по-прежнему, одними из основных являются также требования повышения функциональной универсальности и обеспечения гибкости ПР, которые, кроме отмеченного принципа агрегатирования, определяются степенью интеграции элементов и развитием средств и методов информационного обеспечения ПР и робототехнических систем.

Применительно к системам управления ПР одним из перспективных путей решения задачи повышения функциональной универсальности и гибкости является построение агрегатированной многоуровневой системы с магистральными связями между уровнями, разработка которой становится возможной с появлением больших интегральных схем, микропроцессоров, а также микро-ЭВМ с магистральным принципом организации. Такая система должна включать в себя центральную систему управления, например, реализованную на машинах серии СМ, и подсистемы управления движением, сенсорного и зрительного восприятия на базе микропроцессоров.

Существующие ПР в значительной мере являются специализированными устройствами, предназначенными для решения определенного круга задач: захвата и переноса объектов из одной позиции в другую, штабелирования, сборки отдельных неотвественных соединений и т. д. Для этих целей используются, как правило, либо ПР без элементов осязания и адаптации, либо снабженные простыми сенсорными элементами с использованием относительно несложных алгоритмов обработки сенсорной информации, так как номенклатура обслуживаемых объектов и их взаиморасположение ограничено или априорно задано.

Расширение функциональных возможностей ПР, связанное с необходимостью расширения номенклатуры обслуживаемых объектов производства, требует использования более сложных приемов и технических средств получения и обработки сенсорной информации. Наиболее эффективно такие задачи решаются при использовании адаптивных захватных устройств. При этом создаются условия для многоуровневой организации обработки информации, обеспечивающей уже на нижнем уровне (собственно захватных устройств) выделение при помощи детекторов простейших признаков захватываемого объекта, существенных для его распознавания, а также для переналадки в широком диапазоне порога чувствительности встроенных сенсорных каналов в зависимости от поставленной задачи и состояния окружающей среды.

На современном этапе развитие робототехники определяется по существу одним принципом — как в возможно большей степени приспособить ПР к условиям, особенностям и требованиям окружающей среды, обслуживаемого оборудования и объектов обработки и изготовления, а также специфике применяемой

технологии. Подобное направление позволяет четко уяснить и использовать возможности, а также представить место робототехники в общем комплексе автоматизированного производства. С другой стороны, все больше проявляет себя прямо противоположная тенденция — обеспечить большую приспособляемость объектов, оборудования и технологии к возможностям ПР.

Учет только первой тенденции хоть и ведет к совершенствованию робототехнических средств, но в то же время приводит к их усложнению и дополнительным эксплуатационным издержкам, зачастую неоправданным. Учет только второй тенденции ведет к аналогичным результатам, но отнесенным уже к объектам, оборудованию и технологии. Поэтому наиболее рациональное решение состоит в учете обеих тенденций, в результате чего достигаются наиболее простые и эффективные технологические и технические решения с наименьшими затратами сил, средств и времени. Следовательно, общее развитие всего промышленного производства, а на этой основе машиностроения, всех его отраслей, строящегося на базе использования ПР, направлено, с одной стороны, на достижение более тонкой и более развитой структуры применяемых средств и процессов, а с другой — появляется возможность оценивать состояние, в котором находится и эксплуатируется рабочее оборудование, насколько «комфортны» условия его работы. Иными словами, внедрение роботов, как органов замены человека на рабочих операциях производства, объективно приводит к оснащению всех элементов производственной системы средствами осязания, которые позволяют более информативно, а значит, и более надежно проводить рабочий процесс изготовления объектов. Естественно, что при этом система управления как отдельными звеньями, так и всем комплексом технических средств в целом становится более развитой, сложной и требует большего внимания и больших затрат на поддержание своего нормального функционирования.

Таким образом, промышленная робототехника представляет собой взаимосвязанный комплекс сложных научно-технических проблем, успешное решение которых может быть достигнуто только на основе комплексирования исследований и интеграции усилий разработчиков многих отраслей. По существу имеет место классический пример изменения средств производства с последующим совершенствованием производственных отношений, направленных на обеспечение дальнейшего социального прогресса общества и осуществление широкой программы повышения народного благосостояния.

1. А.с. 170864 (СССР).
2. А.с. 440644 (СССР).
3. А.с. 568757 (СССР).
4. А.с. 571369 (СССР).
5. А.с. 622624 (СССР).
6. А.с. 709314 (СССР).
7. А.с. 755542 (СССР).
8. А.с. 810479 (СССР).
9. А.с. 846228 (СССР).
10. А.с. 853203 (СССР).
11. А.с. 975393 (СССР).
12. Автоматизация сборки в кассетах/В. А. Яхимович, В. А. Нейштадт, И. П. Шиманчик и др.— М.: Машиностроение, 1981.— 144 с.
13. Автоматические манипуляторы с программным управлением (промышленные роботы): Состояние, перспективы, проблемы/А. Е. Кобринский, А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра и др.— Станки и инструмент, 1974, № 11, с. 4—11.
14. Аншин С. С., Великович В. Б., Козырев Ю. Г. Общая методика испытаний автоматических манипуляторов.— Станки и инструмент, 1981, № 12, с. 2—5.
15. Аполлонова Л. П., Шумова Н. Д. Механическая звукозапись.— М.: Энергия, 1978.— 232 с.
16. Артоблевский И. И., Кобринский А. Е. Роботы.— Машиноведение, 1970, № 5, с. 3—11.
17. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. Повторение и анализ вычислительных алгоритмов.— М.: Мир, 1979.— 535 с.
18. Бансявичус Р. Ю., Рагульскис К. М. Вибродвигатели.— Вильнюс: Мокслас, 1981.— 193 с.
19. Бобров В. П. Проектирование грузочно-транспортных устройств к станкам и автоматическим линиям.— М.: Машиностроение, 1964.— 291 с.
20. Браславский Д. А. Приборы и датчики летательных аппаратов.— М.: Машиностроение, 1970.— 392 с.
21. Верещагин А. Ф., Генерозов В. Л., Кучеров В. В. Алгоритмы управления манипулятором по вектору скорости.— Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика, 1975, № 3, с. 66—71.
22. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Расчеты пневмоприводов.— М.: Машиностроение, 1975.— 272 с.
23. Гусев А. А. Адаптивные устройства сборочных машин.— М.: Машиностроение, 1979.— 208 с.
24. Ерохин В. И. Применение промышленных роботов в машиностроении: (Обзор. информ.)/ВНИИИнформтяжмаш.— М.: 1974.— 49 с.
25. Ерош И. Л., Игнатъев М. Б. Адаптивные системы управления промышленными роботами.— М.: НИИМаш, 1976.— 63 с.
26. Игнатъев М. В., Кулаков Ф. М., Покровский А. М. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1972.— 248 с.
27. Иноуэ Х. Операционная система для управления движением манипулятора робота электротехнической лаборатории (ЭТЛ).— Интегральные роботы, 1975, вып. 2, с. 323—340.
28. Иоффе Б. А., Калнинь Р. К. Ориентирование деталей электромагнитным полем.— Рига: Зинатне, 1972.— 300 с.
29. Катис Г. П. Визуальная информация и зрение роботов.— М.: Энергия, 1979.— 175 с.
30. Киселев В. М. Фазовые системы числового программного управления станками.— М.: Машиностроение, 1966.— 375 с.
31. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: Справочник.— М.: Машиностроение, 1983.— 376 с.
32. Копп В. Я. Математическая модель цифрового поворотного пневмопривода.— Приборостроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1981, вып. 30, с. 44—52.
33. Корсаков В. С. Автоматизация производственных процессов.— М.: Высш. шк., 1978.— 296 с.
34. Костюк В. И., Ямпольский Л. С., Иваненко И. Б. Промышленные роботы в сборочном производстве.— К.: Техніка, 1983.— 182 с.
35. Костюк В. И., Ямпольский Л. С., Карлов А. Г. Промышленные роботы и их применение.— К.: О-во «Знание» УССР, 1980.— 64 с.
36. Крейнин Г. В. Пневматические приводы промышленных роботов.— Станки и инструмент, 1978, № 7, с. 24—26.
37. Кузнецов М. М., Волкевич Л. И., Замчалов Ю. П. Автоматизация производственных процессов.— М.: Высш. школа, 1978.— 431 с.
38. Курило Р. Э., Рагульскис К. М. Микроманипуляторы с высокочастотным приводом.— Приборы и системы упр., 1981, № 4, с. 27—29.
39. Лебедевский М. С., Федотов А. И. Автоматизация сборочных работ.— Л.: Лениздат, 1970.— 448 с.
40. Лимонов Ю. М. Математическое моделирование многопоршневого позиционного привода.— Теория механизмов и машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1981, вып. 31, с. 7—12.
41. Митрофанов С. П., Гульнов Ю. А. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства.— М.: Машиностроение, 1981.— 287 с.
42. Молчановский Е. Г., Лесин Я. Л., Явор А. Н. Сервомеханизмы с цифровым управлением.— Станки и инструмент, № 6, 1980, с. 10—11.
43. Никифоров В. В., Новаченко С. И., Павлов В. А. Язык РОКОЛ для управления роботом.— В кн.: Робототехника. Л.: Ленингр. политехн. ин-т, 1976, с. 74—78.
44. Николаенко Л. Б., Губарев А. П., Ямпольский Л. С. О синтезе дискретных систем управления робототехнологическими комплексами.— Автоматизация произв. процессов в машино- и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1984, вып. 23, с. 37—44.
45. Николаенко Л. Ю., Ямпольский Л. С. К решению задачи логико-программного управления транспортирующими и ориентирующими движениями автоматического манипулятора.— Идентификация и автоматизация технолог. процессов и пром. установок: Межвуз. сб. науч. тр. Куйбышев, Куйбышев. авиацион. ин-т, 1982, с. 30—35.
46. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов.— М.: Машиностроение, 1980.— 592 с.
47. Новиков Б. К. Системный подход к автоматизированному проектированию.— Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1978, № 272, с. 13—34.
48. Омельченко В. А. Гидравлические грузочно-транспортные и ориентирующие устройства.— Автоматизация произв. процессов в машино- и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1972, вып. 12, с. 108—114.
49. Организация поисковых процедур в системах автоматизированного проектирования/Н. И. Гореликов, Л. С. Ямпольский, А. В. Найдек и др.— Приборы и системы упр. 1984, № 7, с. 14—20.
50. Павлов В. В. Основы автоматизации проектирования технологических процессов сборки.— М.: МАТИ, 1975.— 92 с.
51. Патон Б. Е., Спыну Г. А., Тимошенко В. Г. Промышленные роботы для сварки.— К.: Наук. думка, 1978.— 228 с.
52. Переналаживаемые сборочные автоматы/В. А. Яхимович, Ю. А. Хашин, О. Н. Вертоградов и др.— К.: Техніка, 1979.— 175 с.
53. Перовский А. П., Перовская С. А. Новые эластичные захваты роботов-манипуляторов.— Вестн. машиностроения, 1981, № 7, с. 10—11.

54. Петренко А. И. Основы автоматизированного проектирования.— К.: Техніка, 1982.— 296 с.
55. Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник/ Под ред. Е. В. Герца.— М.: Машиностроение, 1981.— 408 с.
56. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: Динамика и алгоритмы.— М.: Наука, 1978.— 400 с.
57. Промышленные роботы: Структура, типы и характеристики/Б. Н. Сурнин, А. Г. Баранов, И. В. Калабин и др.— Машиноведение, 1973, № 6, с. 15—18.
58. Рвачев В. А. Геометрические приложения алгебры логики.— К.: Техніка, 1967.— 211 с.
59. Розенфельд Б. А. Многомерные пространства.— М.: Наука, 1966.— 647 с.
60. Романченко А. В., Яхимович В. А. Управление относительным ориентированием в сборочных автоматах, оснащенных промышленными роботами.— Автоматизация произв. процессов в машино- и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1980, вып. 19, с. 127—132.
61. Рыжкова Н. П., Погорелов Б. В., Ямпольский Л. С. Оценка технологичности узлов при роботизированной сборке.— Автоматизация произв. процессов в машино- и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1979, вып. 18, с. 94—102.
62. Саттаров Д. К. Волоконная оптика.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1973.— 279 с.
63. Седач В. В., Мондрус В. С. Динамика позиционного гидропривода сборочных манипуляторов.— Теория механизмов и машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1981, вып. 31, с. 3—6.
64. Сентяков Б. А. Исследование струйного вихревого первичного преобразователя для систем управления пневмоприводом: Автореф. дис. на соиск. канд. техн. наук.— К., 1982.— 22 с.
65. Системний аналіз роботизованого виробництва як методологія проектування робототехнологічних комплексів/Л. С. Ямпольський, В. С. Наймушин, Л. Ю. Ніколаєнко та інш.— Вісник АН УРСР, 1981, № 12, с. 46—54.
66. Системы управления промышленными роботами и манипуляторами/Е. И. Юревич, Ю. Д. Андрианов, С. И. Новаченко и др.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.— 182 с.
67. Смилянский В. И. Технологические основы расчета и проектирования автоматических сборочных машин. Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1974.— 174 с.
68. Уитни Д. Е. Математические основы координатного управления протезами и манипуляторами.— Тр. амер. о-ва инж.-механиков., 1974, т. 34, № 4, с. 264—278.
69. Управление роботами от ЭВМ/Е. Н. Юревич, С. И. Новаченко, В. А. Павлов и др.— М.: Энергия, 1980.— 262 с.
70. Шерешевский Н. И. Анализ и синтез многоярусной сборки.— М.: Машиностроение, 1971.— 248 с.
71. Экономическое управление созданием систем машин/С. М. Ямпольский, С. В. Козаченко, В. В. Лобанов и др.— К.: Наук. думка, 1981.— 235 с.
72. Ямпольский Л. С. Информационная модель оптимизируемого процесса обработки металлов резанием.— Автоматизация произв. процессов в машино- и приборостроении: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1979, вып. 18, с. 16—25.
73. Ямпольский Л. С. Принципы построения сборочных роботизированных технологических комплексов.— К.: О-во «Знание» УССР, 1980.— 24 с.
74. Ямпольский Л. С. Системный анализ роботизируемого производства как методология построения робототехнических систем.— В кн.: Тр. XXVII Междунар. науч. коллоквиума. Јена: Magnus Poser, 1982, т. 2, с. 123—127.
75. Ямпольский Л. С., Брунштейн Ю. Г. Преобразователи линейных перемещений.— К.: Техніка, 1974.— 145 с.
76. Ямпольский Л. С., Ткач М. М., Костюк В. И. Технологическая подготовка роботизированного производства.— К.: Вища шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1984.— 72 с.
77. Яхимович В. А. Транспортно-загрузочные и сборочные устройства и автоматы.— К.: Техніка, 1976.— 190 с.

78. Яхимович В. А., Головащенко В. Ф., Кулинич И. Я. Автоматизация сборки резьбовых соединений.— Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1982.— 160 с.
79. Hirose Sh., Umetani Y. The development of Soft Gripper for the Versatile Robot hand.— Proc. of the 7-th Int. Symp. in Industrial Robots. Japan, Jap. Ind. Robot. assoc., 1977, p. 353—360.
80. Jablonowski J. Robot that assemble.— Amer. Mach., 1981, v. 125, № 11, p. 175—190.
81. Jampolskiy L. S., Taranenko V. A., Jevdokimov V. D. Automatizované systémy riadenia procesu obrábania.— Bratislava: Alfa, 1980.— 70 s.
82. Jachimovic V. A. Orientácní mechanismy montážních automatů a robotů. SNTL — Nakladatelství technické literatury.— Praha, 1980.— 129 s.
83. Matsushima Kozo, Hasegawa Kensuke. Study on the industrial robot with adaptability.— Bull. Tokyo Inst. Technol., 1974, № 1, 127, p. 115—129.
84. Morichita Karuhira, Boothroyd Geoffrey. Group technology... What role for robots?— Automation, 1973, v. 20, № 8, p. 34—39.

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Робототехнические системы	5
1. Основные понятия и определения	5
2. Системный анализ роботизируемого производства	8
3. Формализация описания производственных (роботизированных) процессов	13
4. Морфологическое описание объектов роботизации	19
5. Иерархия роботизированного производства	23
Глава II. Технологическая подготовка роботизированного производства	24
1. Особенности подготовки производства к внедрению ПР	24
2. Технологический анализ объектов роботизации	27
3. Порядок проведения работ по обследованию производства	29
4. Эффективность внедрения ПР	39
5. Организация и проведение испытаний ПР	41
Глава III. Организация рабочей среды	44
1. Взаимодействие ПР с рабочей средой	44
2. Устройства организации рабочей среды	45
3. Транспортные устройства	46
4. Загрузочные устройства	48
5. Ориентирующие устройства	50
6. Накопители	60
Глава IV. Механика промышленных роботов	72
1. Принципы построения и конструкция роботов	72
2. Управление планированием траектории движения рабочих органов ПР	81
3. Кинематический анализ и динамика манипуляционной системы ПР	85
4. Перспективные конструкции манипуляционных систем ПР	94
Глава V. Исполнительные механизмы промышленных роботов	98
1. Исполнительные механизмы общего назначения	98
2. Многопозиционные линейные гидropневмоприводы	104
3. Цифровые поворотные пневмоприводы	110
4. Высокочастотные вибрационные приводы	114
Глава VI. Захватные устройства промышленных роботов	120
1. Кинематика связи «захватное устройство—объект»	120
2. Конструкции захватных устройств	122
3. Универсальные захватные устройства	127
4. Адаптивные захватные устройства	131
Глава VII. Системы управления промышленными роботами	142
1. Иерархия управления ПР	142
2. Классификация систем управления ПР	144
3. Общение человека-оператора с роботом	151
4. Запоминающие устройства систем управления ПР	152
5. Логико-программное управление транспортирующими и ориентирующими движениями ПР	157
6. Совершенствование элементной базы систем управления	161
Глава VIII. Информационное обеспечение РТК	164
1. Элементы и средства внутреннего и внешнего информационного обеспечения	164
2. Конструкция робототехнических средств с элементами информационного обеспечения	173

Глава IX. Автоматизированное проектирование гибких робототехнических систем	184
1. Гибкие робототехнические системы как объект автоматизированного проектирования	184
2. Принципы построения систем автоматизированного проектирования	185
3. Постановка задачи проектирования РТК	187
4. Задачи разработки обеспечения САПР РТК	190
5. Структура и функциональные задачи САПР РТК	192
6. Методы описания объектов роботизации	198
7. Разработка принципиальной схемы сборки	203
8. Организация диалога при проектировании роботизированных технологий	206
Глава X. Применение промышленных роботов и робототехнических систем	209
1. Промышленные роботы в механообрабатывающем производстве	209
2. Особенности использования исполнительных ПР	220
3. Особенности использования ПР в сборочных процессах	224
Глава XI. Опыт использования роботов в часовой промышленности	230
1. Предпосылки и стратегия разработки РТК для сборки механизмов наручных часов	230
2. Транспортная система РТК	231
3. Привод, система управления и средства контроля сборочного модуля	232
4. Взаимосвязь функций и кинематики минироботов	233
5. Технологические приемы и оснастка для сборки механизмов наручных часов	234
6. Модификации минироботов с ортогональным и наклонным движениями захватного устройства	242
7. Двухзвенный миниробот	250
Приложение. Пути развития промышленной робототехники	254
Список литературы	258