

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Ю.И. Сулимов**

# **РОБОТОТЕХНИКА**

**Учебное пособие**

**ТОМСК – 2007**

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра промышленной электроники**

**Ю.И. Сулимов**

# **РОБОТОТЕХНИКА**

**Учебное пособие**

**2007**

Рецензент: начальник отдела программного обеспечения, зам.  
главного технолога ОАО «Сибэлектромотор»  
Курчаба Н.И.

**Сулимов Ю.И.**

Робототехника: Учебное пособие. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. — 99 с.

Рассмотрены история создания робототехники как современной отрасли науки и техники.

Приведено устройство роботов, способ управления роботами, принципы построения.

Представлено применение роботов в различных отраслях народного хозяйства и других областях человеческой деятельности.

© Сулимов Ю.И., 2007

© ТУСУР, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Из истории развития робототехники .....</b>	<b>8</b>
1.1 Начало робототехники .....	8
1.2 Появление и становление современной робототехники.....	9
1.3 Развитие отечественной робототехники .....	11
<b>2 Промышленные роботы .....</b>	<b>12</b>
2.1 Понятие «Робот».....	12
2.2 Функции и технические характеристики роботов .....	17
2.3 Место робототехники в системе технических наук.....	19
2.4 Принципы работы сервомеханизма .....	20
2.5 Степени подвижности и системы координат манипуляторов.....	23
2.6 Схема привода манипулятора.....	26
2.7 Многозвенные манипуляторы .....	28
2.7.1 Принципы управления многозвенными манипуляторами.....	29
2.7.2 Параллельный перенос и вращение координат в векторном методе .....	30
2.8 Типы сервомеханизмов .....	37
2.8.1 Электрические сервосистемы.....	37
2.8.2 Электрогидравлические сервосистемы .....	41
2.8.3 Пневматические сервосистемы .....	44
2.8.4 Программируемые сервосистемы .....	46
<b>3 Системы программного управления промышленных роботов .....</b>	<b>46</b>
3.1 Структура системы программного управления.....	49
3.2 Промышленный робот РМ 104.....	55
3.3 Характеристики исполнительных устройств роботов.....	62
3.4 Датчики обратных связей .....	63
<b>4 Системы адаптивного управления.....</b>	<b>65</b>
4.1 Структура адаптивной системы управления .....	68
4.2 Программное обеспечение адаптивных роботов.....	70
4.3 Системы очувствления роботов .....	72
4.3.1 Силомоментные системы очувствления.....	73

4.3.2 Тактильные системы оцувствления .....	74
4.3.3 Локационные системы оцувствления .....	75
<b>5 Системы технического зрения.....</b>	<b>77</b>
<b>6 Гибкие производственные системы .....</b>	<b>84</b>
6.1 Основные сведения о гибких производственных системах	85
6.1.1 Этапы прохождения разработки .....	87
6.1.2 Место промышленных роботов в ГПС .....	89
6.1.3 Структура технического обеспечения СУ ГПС .....	95
6.2 Структура гибкого производственного модуля.....	97
6.3 Структура программного обеспечения СУ ГПС .....	101
<b>Рекомендуемая литература.....</b>	<b>104</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Роботы это принципиально новый вид универсальных машин автоматов, образом для которых стал сам человек, его руки, органы чувств, интеллект и т.д. Они заменяют человека на опасных и вредных участках и конечно там, где человек не может находиться — это глубины океана, космос, экстремальные ситуации другого типа.

Идеи и попытки создания механических людей сопутствуют человеку в течение всей его истории — древний Египет — статуи богов, флейтист, варианты музыкантов на клавесине. Все эти автоматы работают по заданной заранее программе. Такие программы запоминались на механических ЗУ. Источником энергии являлось — сила тяжести, энергия пружины.

Все эти игрушки не имеют практического значения. Современная робототехника возникла всего около 50 лет тому назад. С тех пор парк роботов в мире ежегодно увеличивался на 15–20%. В передовых странах он стал соизмерим с численностью рабочих.

На рис. В.1 показана функциональная схема робота.

Робот содержит — исполнительные устройства (манипуляторы и средства передвижения со своими приводами, управляющую систему, сенсоры, дающие информацию о внешней среде и систему связи с оператором и другими механизмами. Манипуляторы это аналоги рук человека. Они состоят из подвижных звеньев с поступательным или угловым перемещением. Их сочетание определяет систему координат в которых действует сама манипуляционная система.

Манипулятор заканчивается рабочим органом — захватным устройством. Захватное устройство имеет много вариантов — присоски, электро-механические схваты. Вместо захватных устройств манипулятор может быть снабжен рабочим инструментом (пульверизатор, сварочная головка, отвертка, пинцет и т.д. Среди типов роботов различают подвесные, напольные, гусеничные для горной местности, колесные роботы для передвижения по труднопроходимой местности, роботы для передвижения по верти-

кальным поверхностям. Для работы под водой разрабатываются плавниковые роботы.



Рис. В.1 — Функциональная схема робота

Роботы с использованием искусственного интеллекта позволяют создавать человеко-подобные роботы. Алгоритмы управления создаются и отрабатываются на основе различных играх людей (от шахмат до футбола). Моделируются поведения животных с целью создания алгоритмов, которые могут быть использованы в интеллектуальных роботах. Роботы уступают в интеллекте человеку и ему приходится иногда брать управление на себя. Особое применение нашли роботы в машиностроении. Здесь они заменяют человека в таких операциях как термические

операции, изготовление валов включая каленчатые, при этом выполняют трамвоопасные и наиболее тяжелые работы.

Нашли применение роботы при выполнении основных технологических операций. Здесь роботы выполняют задачи основного технологического оборудования или квалифицированного рабочего. Применяются роботы и в обслуживании складских помещений в виде складских роботов и роботов штабелеров.

Особое применение нашли роботы в экстремальных особо опасных ситуациях. Толчок к ее развитию дала авария на чернойбыльской АЭС.

Среди перспектив роботостроения следует отметить миниатюризацию и интеллектуализацию позволяющую строить умных роботов с развитыми творческими способностями. Такие роботы способны заменить и превзойти человека и таким образом создать робот сапиенс. Именно такие роботы освоят глубины океана, луну, ближние планеты. Такова стратегическая цель робототехники.



# 1 ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

## 1.1 Начало робототехники

Еще в глубокой древности возникли идеи и были предприняты попытки создания человекоподобных устройств, подвижных статуй, механических слуг и т.д. В Китае, Древнем Египте, Вавилоне пытались создать статуи богов с подвижными частями тела и им удалось создать статуи с подвижной головой и подвижными руками.

В древности создавались целые механические кукольные театры, в которых куклы приводились в движение с помощью ниток. Существовали и другие автоматы древности, в которых в качестве энергии применялись вода, пар, гравитация.

В дальнейшем использовались автоматы, основанные на использовании часовых механизмов, в которых использовалась энергия сжатой пружины. В этот же период появились первые подвижные человекоподобные механические фигуры — *андроиды*. Так андроид Альберта Великого (1193–1280) представлял из себя куклу ростом с человека, которая могла открывать и закрывать дверь и кланяться входящему человеку [1].

С развитием часового мастерства были созданы андроиды-музыканты, рисовальщики, писцы и т.д. Швейцарскими часовщиками Пьером-Жаком Дро и его сыном Анри Дро (1752–1791) был создан ряд человекоподобных автоматов. От имени сына позднее было образовано и само название «*андроид*». Эти андроиды представляли собой многопрограммные автоматы со сменяемыми программами. Программы реализовывались с помощью сменных кулачков, которые устанавливались на вращаемом барабане или подобных механических устройствах. В качестве привода использовался часовой механизм.

С развитием электротехники и электроники в XX веке интерес к созданию андроидов значительно увеличился. Были созда-

ны человеко-подобные автоматы, которые по командам, передаваемым голосом могли садиться, вставать, двигать руками и говорить. Они управлялись по радио и могли ходить, говорить и выполнять различные операции.

## **1.2 Появление и становление современной робототехники**

С развитием производства появилась потребность в универсальных манипуляционных машинах-автоматах способных заменить однообразный и тяжелый труд человека.

Сначала появились манипуляторы с ручным или автоматизированным управлением. Затем появились манипуляторы без приводов и повторяли на расстоянии движения руки человека за счет мускульной силы. Позднее были разработаны и изготовлены манипуляторы с приводами электромеханическими, гидравлическими или пневматическими. Приводы управлялись человеком различными способами включая биоэлектрический. Впервые такие манипуляторы были созданы в 1940–1950 гг. для исследований в области атомной энергетики. Такие манипуляторы управляются ЭВМ и снабжены захватным устройством, с применением различного типа датчиков — контактных и фотоэлектрических.

Такие манипуляторы были прообразом оцувствленного робота с адаптивным управлением, который мог ходить, находить и брать произвольно расположенные предметы. Первые роботы предназначенные для промышленного применения появились на рынке США в 1962 г. В это же время возник термин «промышленный робот» (Industrial Robot).

Динамика дальнейшего развития производства роботов:

- с 1967 г. начат выпуск роботов в Англии по лицензии США;
- с 1968 г. — в Швеции и Японии (по лицензии США);
- с 1971 г. — ФРГ, в 1972г. — во Франции; в 1973г. — в Италии.

По данным [1] динамика роста парка роботов в мире такова:

Год	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
-----	------	------	------	------	------	------	------

Количество роботов (тыс. шт.)	8,5	30	90	400	800	1200	2500
-------------------------------------	-----	----	----	-----	-----	------	------

Стоимость промышленных роботов за последние 10 лет уменьшилась примерно в 5 раз при одновременном улучшении качественных характеристик. Поэтому экономическая эффективность использования роботов возросла и как следствие возросла потребность в промышленных роботах. За год парк роботов в мире возрастает на 20–30 %, а в 1998 г. превысил 1 млн. шт.

Первое место в мире по производству роботов занимает Япония и в ней сосредоточена основная часть мирового парка роботов. Затем следуют США, Италия, Франция и Швеция.

По традиции история развития роботов делится на поколения, а именно, на три поколения.

Роботы первого поколения — это роботы с программным управлением, предназначенные для выполнения жестко запрограммированной операции. Такие роботы лишены возможности воспринимать информацию внешнего мира.

Роботы второго поколения — это осязательные роботы, предназначенные для работы с объектами произвольной формы, выполнения сборочных работ и монтажных операций. Они могут собирать информацию о внешней среде и снабжены большим набором сенсорных датчиков как внешних (оптических, тактильных, телевизионных), так и внутренних датчиков усилий, моментов, положений).

Роботы третьего поколения — это интеллектуальные роботы, предназначенные не только для воспроизведения физических действий человека, но и для воспроизведения интеллектуальной деятельности. Такая деятельность реализована в роботах-андроидах. Реализация последних достижений робототехники сделала возможным создание роботов для обеспечения вполне реальных жизненных потребностей человека. Представителем такого робота является интеллектуальный автономный антропоморфный робот Asimo («Хонда мотор», Япония). Такой робот способен двигаться по лестнице, преодолевать препятствия, вы-

полнять сложные манипуляции и вести диалог с человеком. Робот предназначен для домашних работ, может быть гидом, экскурсоводом. Его вес — 43 кг, скорость ходьбы — 1,6 км/час.

### **1.3 Развитие отечественной робототехники**

Первые результаты по созданию промышленных роботов в СССР появились после 1960 г. и первые промышленные образцы промышленных роботов с позиционным управлением были созданы в 1971 г. (УМ-1, «Универсал-50», УПК-1). В 1968 г. был создан первый управляемый ЭВМ подводный автоматический манипулятор. Первые образцы интегральных роботов с развитой системой очувствления, включая техническое зрение и речевое управление были построены в 1971 г. [1].

В 1972 г. постановлением Госкомитета СССР по науке и технике была разработана программа решения проблемы создания и применения роботов в машиностроении и охватила основные отрасли промышленности и ведомства. В рамках реализации этой программы были созданы 30 серийно выпускаемых промышленных роботов для обслуживания станков и прессов, для нанесения покрытий и точечной сварки с различными видами приводов. К концу 1980 г. парк промышленных роботов в стране превысил 6000 шт.

Промышленные роботы со средствами очувствления появились в отечественной промышленности на сборочных операциях в приборостроении с 1980 г., а первый промышленный робот с техническим зрением МП-8 создан в 1982 г.

После распада СССР плановая работа по созданию промышленных роботов была прервана и серийное производство роботов резко сократилось. К 1995 г. разработки и применение роботов в России уменьшились до количества роботов, используемых в экстремальных ситуациях (стихийные бедствия, аварии, борьба с террористами). В настоящее время отечественная робототехника развивается и принимает участие в международ-

ных проектах и программах. Парк роботов восстанавливается в основном за счет использования роботов иностранных фирм.

## **2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ**

Наряду с разработкой средств робототехники создаются системы и комплексы, использующие эти средства. Несмотря на непрерывное расширение области применения роботов основной областью их применения по-прежнему остается промышленность и приборостроение. На долю этой области приходится около 80% всего мирового парка роботов.

Промышленные роботы подразделяются на технологические, выполняющие основные технологические операции и вспомогательные, которые заняты вспомогательными операциями по обслуживанию основного технологического оборудования. Технологические комплексы с такими роботами называются роботизированными технологическими комплексами.

Основной технической характеристикой промышленных роботов является грузоподъемность промышленного робота, а в приборостроении точность позиционирования схвата манипулятора. В связи с этим при решении вопроса о применении промышленных роботов в действующем производстве необходимо учитывать возможности разработок в роботостроении. Наиболее важные разработки по разделу роботостроения с учетом грузоподъемности приведены в табл. 2.1.

### **2.1 Понятие «Робот»**

Основные компоненты робота показаны на рис. 2.1 и содержат манипуляционный механизм и систему управления (СУ). СУ состоит из микро ЭВМ или комплекса микропроцессоров, а также сенсорных устройств (средств очувствления).

Манипулятор робота состоит из звеньев, которые соединены подвижными кинематическими парами (вращательными или поступательными). Движение звеньев происходит по определенной программе.

Понятий робота много, приведем одно из них. Робот — это устройство способное самостоятельно перемещаться в пространстве, справляться с задачами анализа сцен и распознавания образов, обладающее большим числом степеней подвижности, умеющее анализировать обстановку с помощью обратной связи, а также прогнозировать ситуации, опираясь на собственный опыт и доступную информацию [2].

Таблица 2.1 — Примеры разработок в роботостроении

Тип	Назначение	Грузоподъемность, кг
<b>СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РОБОТЫ</b>		
Система «Каскад»	Перепрограммируемые манипуляционные системы с пневмоприводом для сборочных операций	до 6
ПР с рекуперацией.	Для листоштамповочных производств Для горячей объемной штамповки	1,25; 2,5; 5; 10 10; 40
Робокары. Мостовые транспортные роботы.	—	500; 1000; 2000
Модель «Компарм - Сумы»	Для окраски. Для дуговой и контактной сварки	—
РЭМ-6	Для биофизических работ	—
РВП-2	Перемещение по вертикальным поверхностям для спец. работ	—
<b>УНИВЕРСАЛЬНЫЕ РОБОТЫ</b>		
Портально-мостовые ПР	—	20; 40; 160.
Напольные ПР.	—	2,5; 10; 15; 20; 60; 80

К показателям, определяющим конструкцию роботов относятся:

- грузоподъемность;
- тип привода;
- количество манипуляторов;

- тип и параметры рабочей зоны;
- подвижность и способ размещения;
- исполнение по назначению.

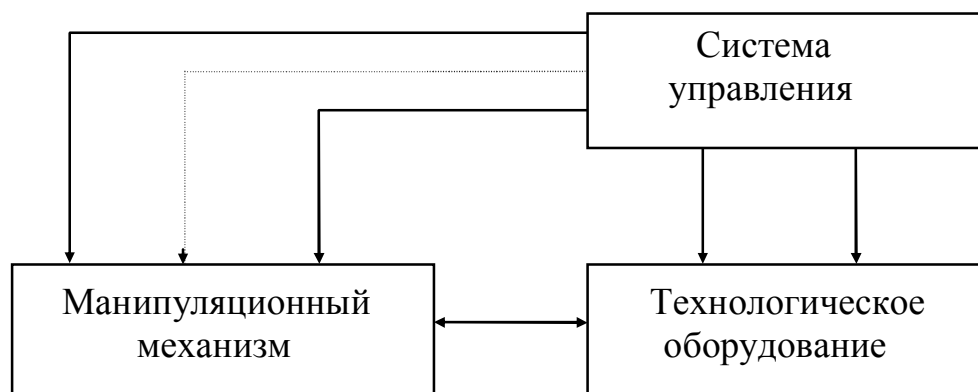


Рис. 2.1 — Основные компоненты робота

*Грузоподъемность робота* — это грузоподъемность манипулятора, для транспортного робота грузоподъемность еще и шасси. По грузоподъемности роботы делятся на следующие группы:

- сверхлегкие до 1 кГ;
- легкие (1–10) кГ;
- средние (10–200) кГ;
- тяжелые (200–1000) кГ;
- сверхтяжелые (более 1000 кГ).

*Приводы* используемые в роботах могут быть электрическими, гидравлическими и пневматическими, а также в комбинации. *Количество манипуляторов* у роботов бывает один, два, три и иногда четыре. В основном применяются один или два. Два манипулятора применяются в роботах, обслуживающих обрабатывающие станки. В этом случае один манипулятор служит для взятия заготовки, а другой для приема обработанной детали.

*Тип и параметры рабочей зоны манипулятора* устанавливают рабочую зону робота, в которой робот может работать не изменяя положения в пространстве. Рабочая зона манипулятора — это пространство, в котором может находиться захват манипулятора при всех возможных положениях звеньев манипулятора [1].



*Подвижность робота* определяется работой робота в подвижном или стационарном режимах.

*Способ размещения* указывает на тип робота (напольный, подвесной или настенный).

*Исполнение по назначению* определяет исполнение (промышленное или лабораторное).

По способу управления роботы подразделяются на программные, адаптивные и интеллектуальные, а управление по отдельным степеням подвижности непрерывным и дискретным.

Динамические свойства роботов определяются быстродействием и точностью движений. Быстродействие манипулятора зависит от скорости перемещения захвата. Скорость перемещения захвата бывает:

- малая — до 0,5 м/с;
- средняя — от 0,5 до 1–3 м/с;
- высокая — при скоростях 10 м/с и выше.

Точность манипулятора характеризуется погрешностью позиционирования. Абсолютная погрешность определяется как:

- малая — до 0,1 мм;
- средняя — от 0,1 до 1 мм;
- высокая — от 1 мм и более.

Роботы с малой погрешностью используются где требуется микронная точность, например, в электронной промышленности. При выполнении транспортных движений применяются роботы с наибольшей погрешностью. Таким образом при целенаправленном выборе роботов необходимо пользоваться следующими характеристиками:

- модель;
- число степеней подвижности;
- нагрузка захвата (усилие);
- длина руки;
- зона действия;
- тип привода;
- скорости движения (град/с, мм/с);
- питание привода (постоянный ток, переменный ток и т.д.)

- точность позиционирования;
- состав внешней периферии;
- язык программирования;
- объем памяти оперативного запоминающего устройства;
- число каналов связи (на вход, на выход);
- метод программирования (аналитический, обучения);
- число точек обучения;
- максимальное число программ;
- максимальная грузоподъемность;
- масса работа.

Для робота-манипулятора, обслуживающего токарный станок характерны следующие характеристики:

- грузоподъемность обрабатываемой детали;
- размер обрабатываемой детали;
- продолжительность цикла, с;
- количество заготовок в магазине.

Робот должен обладать минимальным набором свойств и возможностей, а именно:

- иметь механические руки и захваты (схваты);
- уметь самостоятельно передвигаться и управлять своими действиями;
- иметь исполнительные системы и системы управления, а также вычислительные системы, способные запоминать программы управления обработки информации;
- иметь устройства и датчики, способные определять касание роботом внешних предметов, анализировать степень гладкости поверхности, твердость металла, запах и т.д.

## **2.2 Функции и технические характеристики роботов**

Для определения функций робота приведем сравнение последнего с функциональными возможностями человека, при этом должны быть смоделированы основные функциональные возможности (рис. 2.2).

Современные исследования в области робототехники всецело посвящены проблемам построения манипуляторов и захват-

ных устройств, а также распознаванию визуальной и речевой информации.

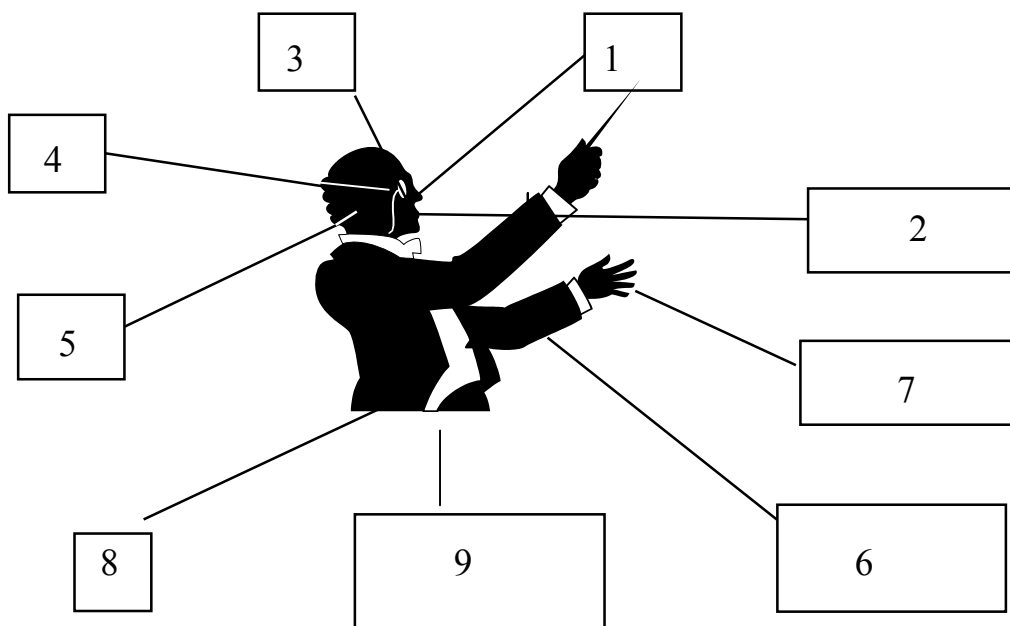


Рис. 2.2 — Сравнительные функциональные возможности робота и человека:

- 1 — искусственное обоняние;
- 2 — синтез речи;
- 3 — искусственный интеллект;
- 4 — техническое зрение, распознавание образов;
- 5 — анализ речи;
- 6 — механические руки (манипуляторы);
- 7 — искусственная кисть (захватное устройство);
- 8 — корпус;
- 9 — искусственные конечности, мобильные роботы-тележки, шагающие аппараты (педипуляторы)

Технические характеристики роботов следующие:

- модель;
- число степеней подвижности;
- нагрузка схвата (усилие);
- длина руки;
- зона действия;
- тип привода;
- скорости движения (град./с, мм/с);
- питание привода (постоянный ток, переменный ток и т.д.)
- точность позиционирования;

- состав внешней периферии;
- язык программирования;
- объем памяти оперативного запоминающего устройства;
- число каналов связи (на вход, на выход);
- метод программирования (аналитический, обучения);
- число точек обучения;
- максимальное число программ;
- максимальная грузоподъемность;
- масса работа.

Для работа-манипулятора, обслуживающего токарный станок характерны следующие характеристики:

- грузоподъемность обрабатываемой детали;
- размер обрабатываемой детали;
- продолжительность цикла, с;
- количество заготовок в магазине.

### 2.3 Место робототехники в системе технических наук

Изучение курса робототехники охватывает большую область науки и техники (рис. 2.3).

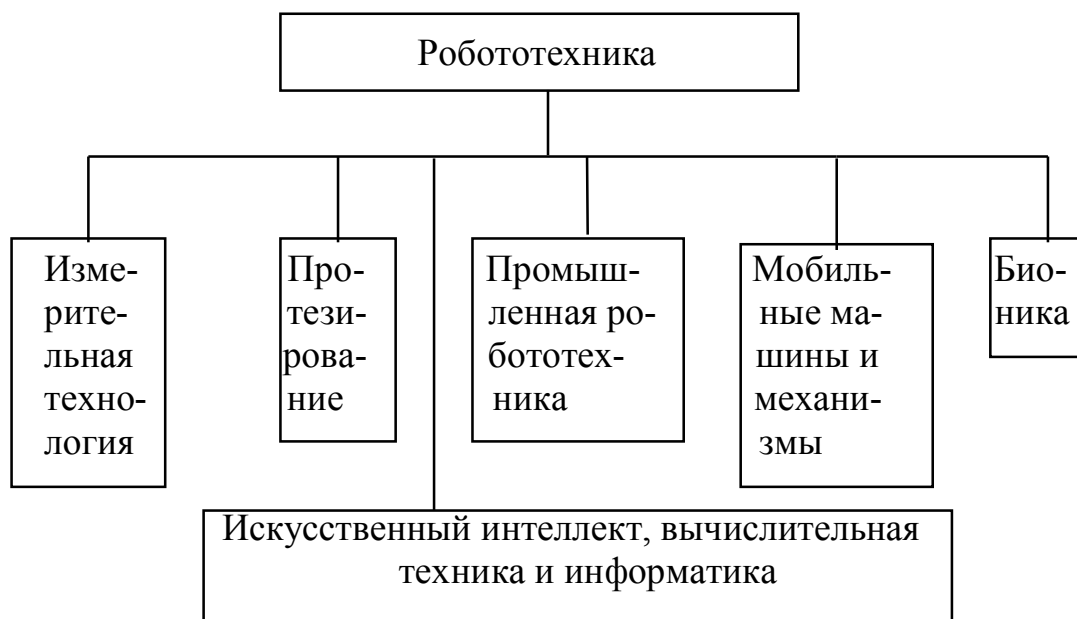


Рис. 2.3 — Научные направления робототехники

Рассмотрим предметную область науки о роботах по приведенным на рисунке направлениям.

*Измерительная технология:*

- Создание систем технического зрения, алгоритмов распознавания образов, датчиков для вычисления координат объектов в трехмерном пространстве.
- Разработка алгоритмов анализа сцен, построение систем анализа речевого сигнала и синтезаторов речи.
- Работы по полному очувствлению руки робота.

*Искусственный интеллект:*

- Изучение методов функциональной имитации возможностей человеческого разума и создание технических систем, способных самостоятельно рассуждать и решать конкретные задачи.

*Протезирование:*

- Разработка и конструирование искусственных конечностей.
- Промышленная робототехника:
- Внедрение промышленных роботов для автоматизации многих производственных операций (сборка плат, автомобилей и т.д.).

*Мобильные машины и механизмы:*

- Разработка робототехнических систем, имеющих движущиеся шасси с автоматически управляемыми приводами.

*Бионика:* разработка устройств на основе знаний о живых организмах.

## **2.4 Принципы работы сервомеханизма**

В соответствии с японским промышленным стандартом сервомеханизм или привод — это «система автоматического управления, в которой входной управляющий сигнал преобразуется в механическое линейное или угловое перемещение управляемого объекта» [3].

Объектом управления в робототехнике могут быть температура, давление, усилие и т.д.

Для сервомеханизмов, применяемых в исполнительных системах манипуляторов промышленных роботов, объектом управления часто является позиция звеньев манипулятора, а также ориентация звеньев при условии вращательных движений в конструкции манипулятора. Значительно реже в качестве объекта управления выступают скорость перемещения манипулятора и усилие, прикладываемое манипулятором к внешним предметам. Принцип работы сервомеханизма поясняется рисунком 2.4.

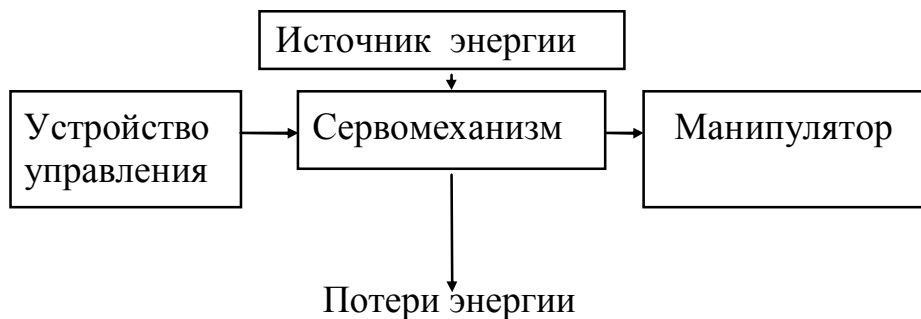


Рис. 2.4 — Принцип работы сервомеханизма

Как правило, мощность выходного сигнала, под действием которого происходит необходимое движение, во много раз превышает мощность входного управляющего воздействия. Естественно, для того, чтобы добиться усиления входного сигнала, необходимо извне подводить дополнительную энергию. Потребителями этой энергии обычно являются электродвигатели или гидравлические цилиндры. Они получают эту энергию и вырабатывают усиленный сигнал. В дальнейшем будем называть такие устройства исполнительными.

Необходимо отметить, что величина выходного сигнала не всегда должна превышать величину входного управляющего воздействия. Например, в микрохирургии входной сигнал манипулятора в тысячу раз больше выходного сигнала, который задает целевое положение хирургического инструмента. В подобных сервомеханизмах следует не усиливать, а уменьшать входной сигнал.

Классификация сервомеханизмов по типу исполнительных устройств приведена на рис. 2.5.

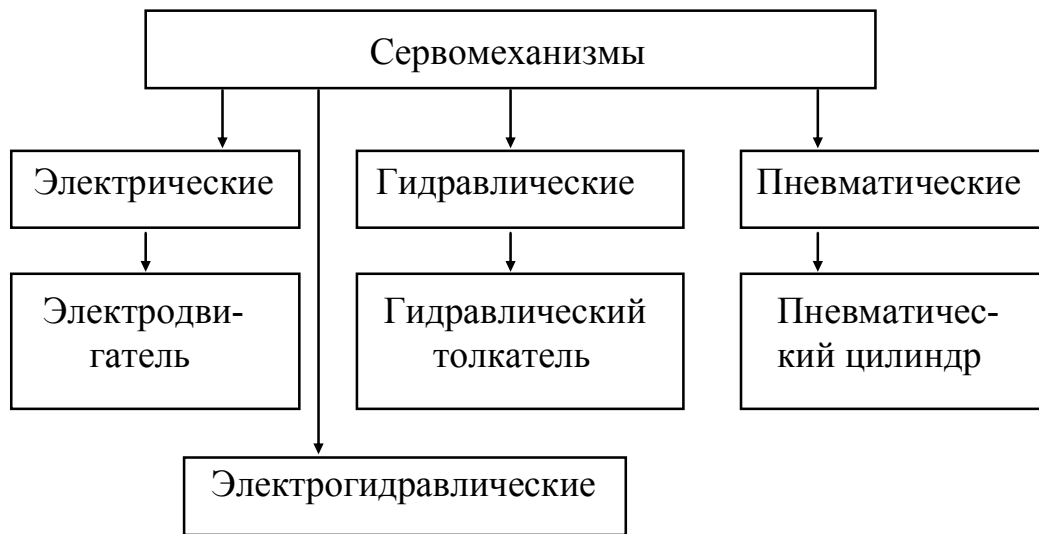


Рис. 2.5 — Классификация сервомеханизмов

Сравнительные характеристики сервосистем по виду конструкции, стоимости и мощности приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2 — Сравнительные характеристики сервосистем

Тип сервомеханизма	Вид конструкции	Стоимость	Мощность	Примечание
Электрический	Простая	Малая	Невысокая	Отсутствие загрязнения
Гидравлический	Сложная	Высокая	Большая	Загрязнение маслом
Пневматический	Сложная	Сравнительно высокая	Средняя выходного сигнала	Отсутствие загрязнения

К основному типу манипуляционных систем относятся механические манипуляторы. Манипуляторы — это пространственные механизмы, состоящие из звеньев, образующих кинематические пары, которые могут совершать угловые или поступательные движения с помощью приводов в каждой степени дви-

жения. Обычно манипуляторы заканчиваются рабочим органом — захватом.

## 2.5 Степени подвижности и системы координат манипуляторов

Различают степени подвижности передвижные и угловые. Передвижные степени подвижности служат для перемещения рабочего органа в рабочей зоне манипулятора, а угловые для его угловой ориентации. Для перемещения рабочего органа в пространстве достаточно трех степеней подвижности, для более сложных движений и повышения быстродействия манипуляторы обычно снабжают дополнительными степенями подвижности. Несмотря на усложнение и удорожание робота современные манипуляторы содержат до 8–9 степеней подвижности. Конструкции манипуляторов с тремя передвижными степенями в различных системах координат и их рабочие зоны показаны на рис. 2.6–2.9 [1].

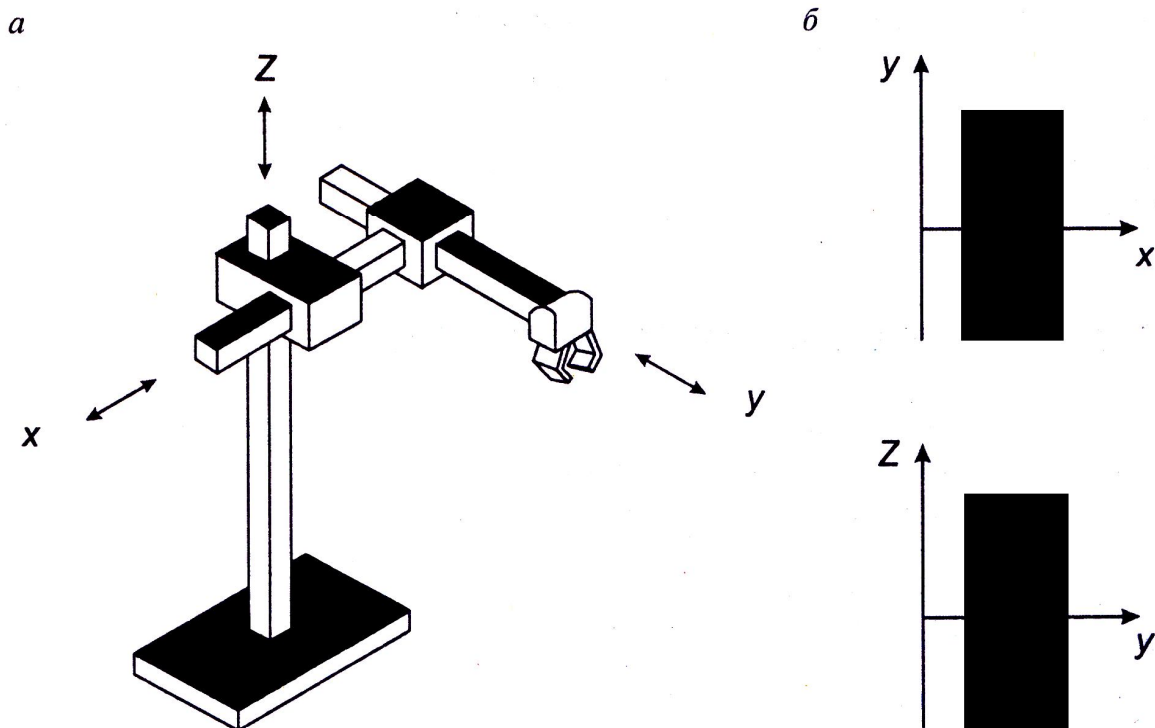


Рис. 2.6 — Манипулятор с прямоугольной системой координат (а) и его рабочая зона (б)



Манипуляторы функционирующие в прямоугольной системе координат (рис. 2.6, *a*) имеют рабочую зону в форме параллелепипеда и перемещения рабочего органа манипулятора только поступательные. Программирование робота выполняется в прямоугольной системе координат и пересчет программ из одной системы координат в другую не требуется.

В манипуляторах, работающих в цилиндрической системе координат (рис. 2.7) совместно с поступательными перемещениями происходит одновременно угловое перемещение. При этом, рабочая зона ограничена цилиндрическими поверхностями.

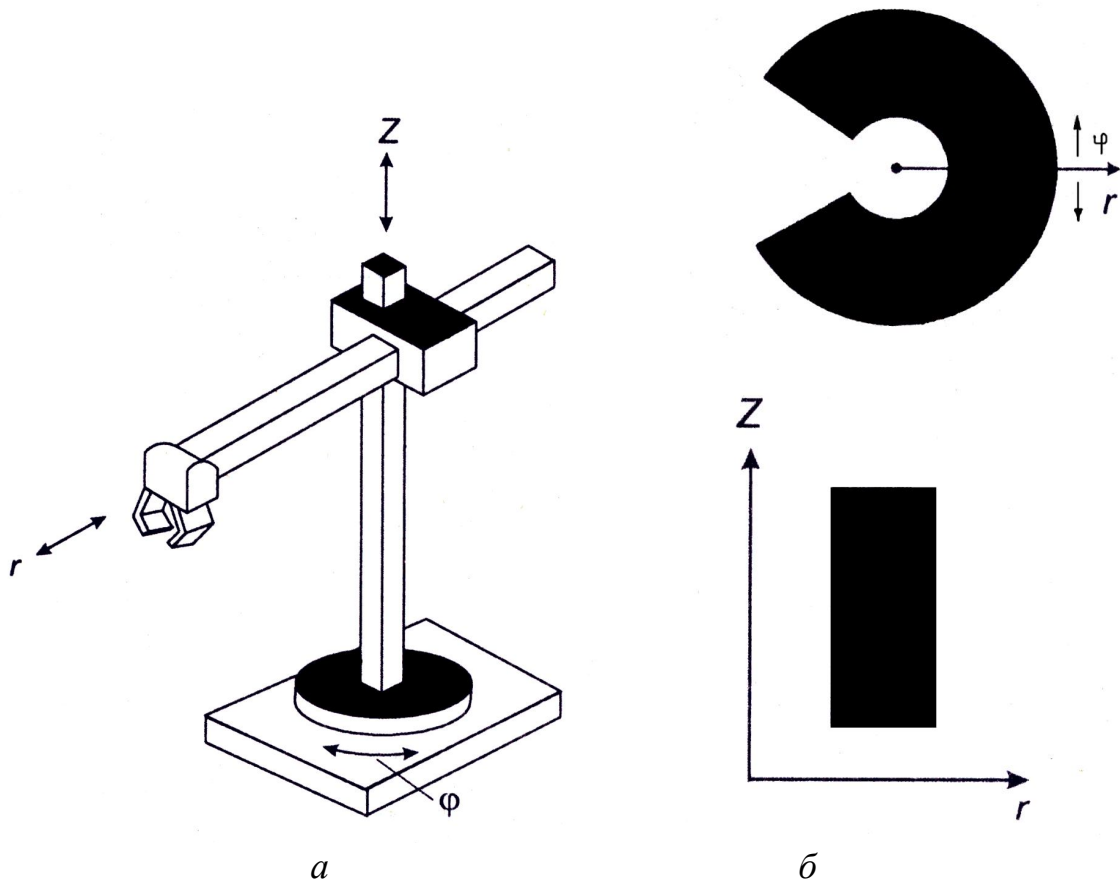


Рис. 2.7

*a* — манипулятор с цилиндрической системой координат;  
*б* — его рабочая зона

В сферической системе координат (рис. 2.8) происходят два угловых перемещения и рабочая зона ограничена сферическими

поверхностями. Манипуляторы со сферической системой координат сложнее цилиндрической системы, но выглядят компактнее.

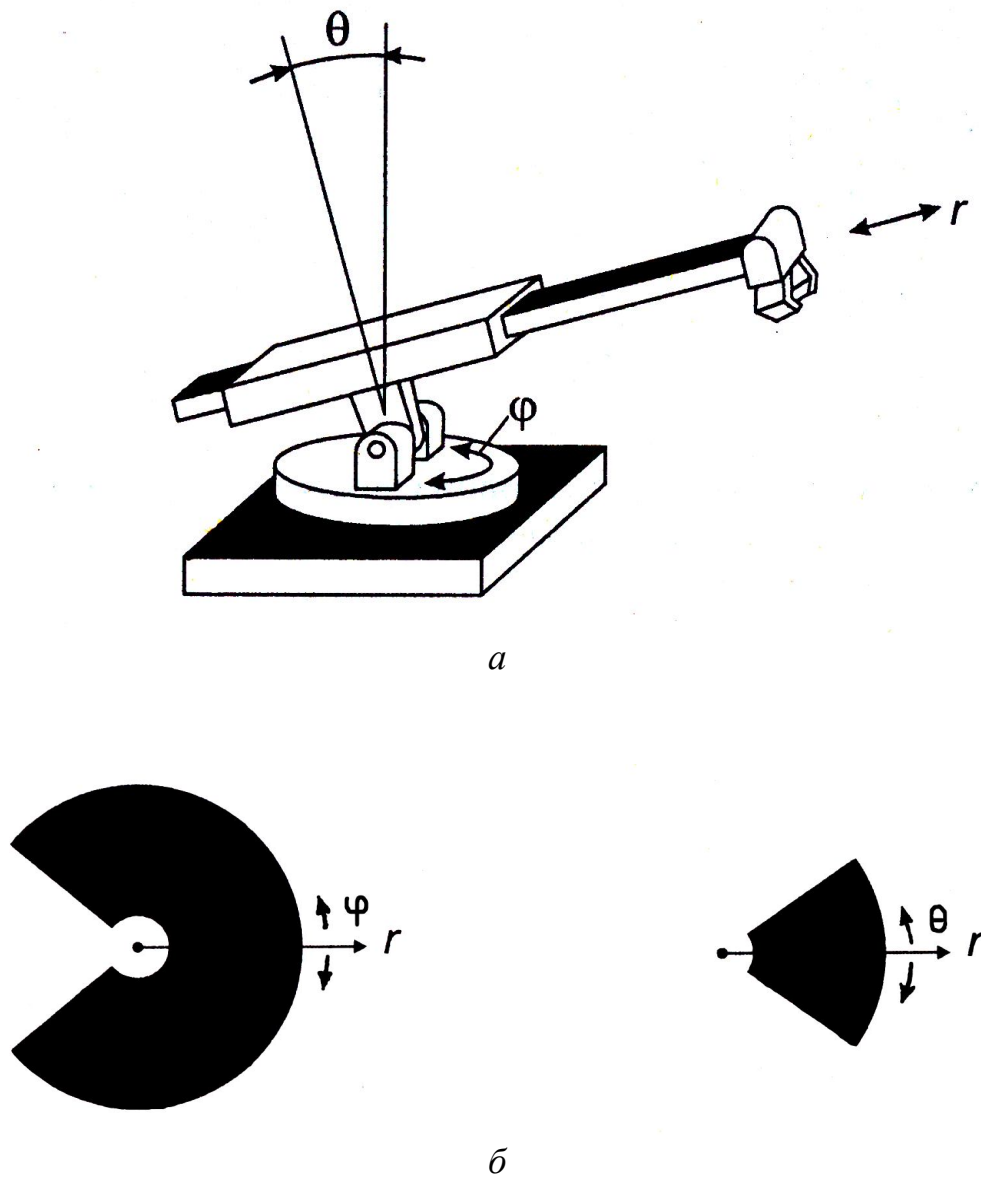


Рис. 2.8

*a* — Манипулятор со сферической системой координат;  
*б* — рабочая зона манипулятора

Манипулятор с угловой системой координат (рис. 2.9) производит только угловые перемещения, а все его звенья представляют собой шарниры. Такие манипуляторы называют шарнир-

ными и антропоморфными. Роботы с такими манипуляторами могут складываться в пределах своих габаритов, обладают наибольшей компактностью.

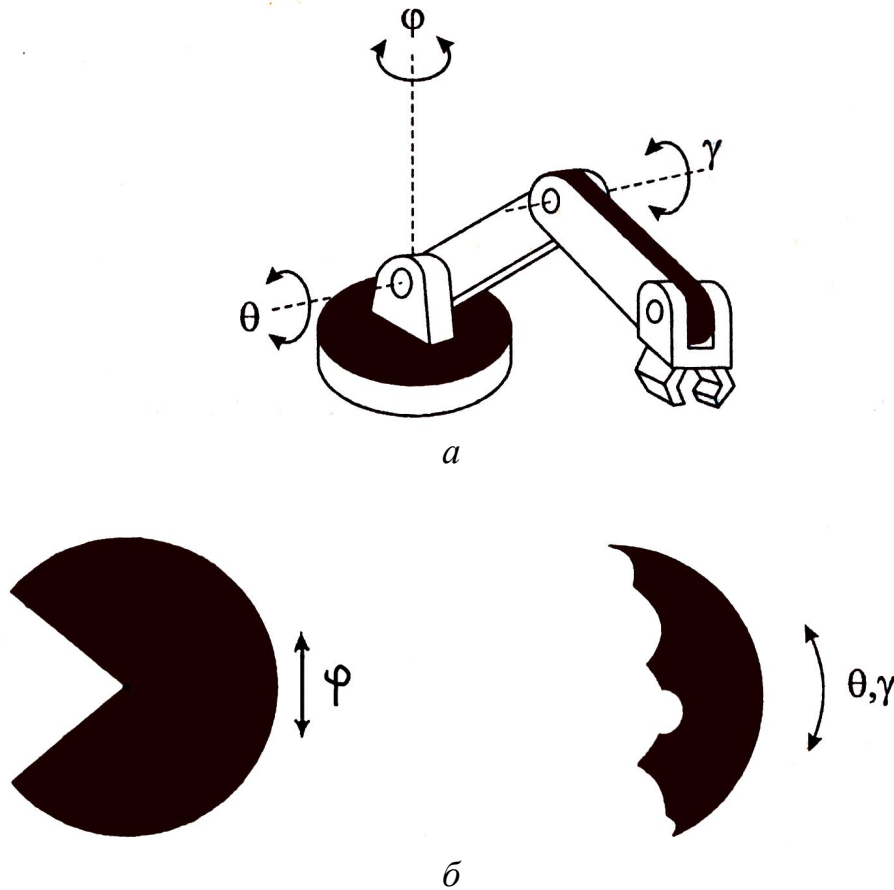


Рис. 2.9

*a* — манипулятор с угловой системой координат;  
*b* — его рабочая зона

## 2.6 Схема привода манипулятора

Привод состоит из двигателя, схемы управления приводом, преобразователя вращательного движения в поступательное и наоборот, редуктора, тормоза и муфты сцепления. Требования к приводам, работающим в роботах очень жесткие, а именно, габариты и масса должны быть минимальными, а процесс захода захвата на объект манипулирования должен быть неколебательным. Быстродействие привода должно быть таким, чтобы скорость поступательного движения на выходе привода составляла

от долей до нескольких метров в секунду, а погрешность обработки перемещения равнялась долям миллиметра.

Типовая схема привода манипулятора приведена на рис. 2.10.

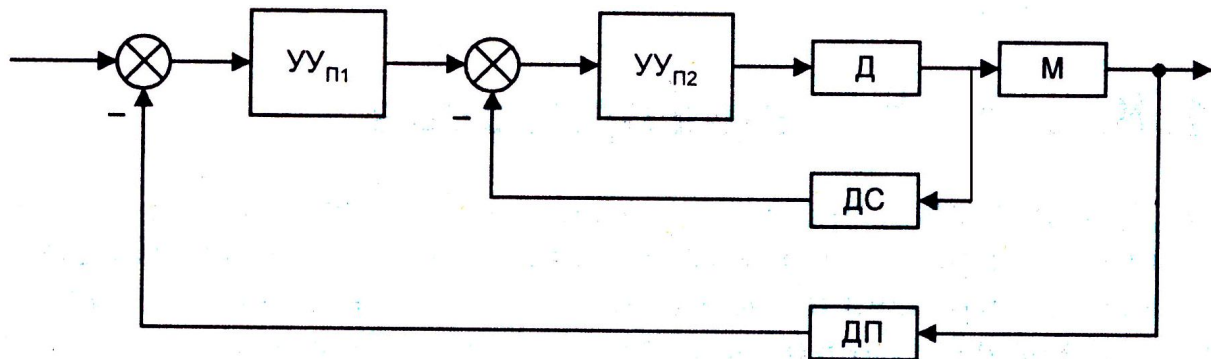
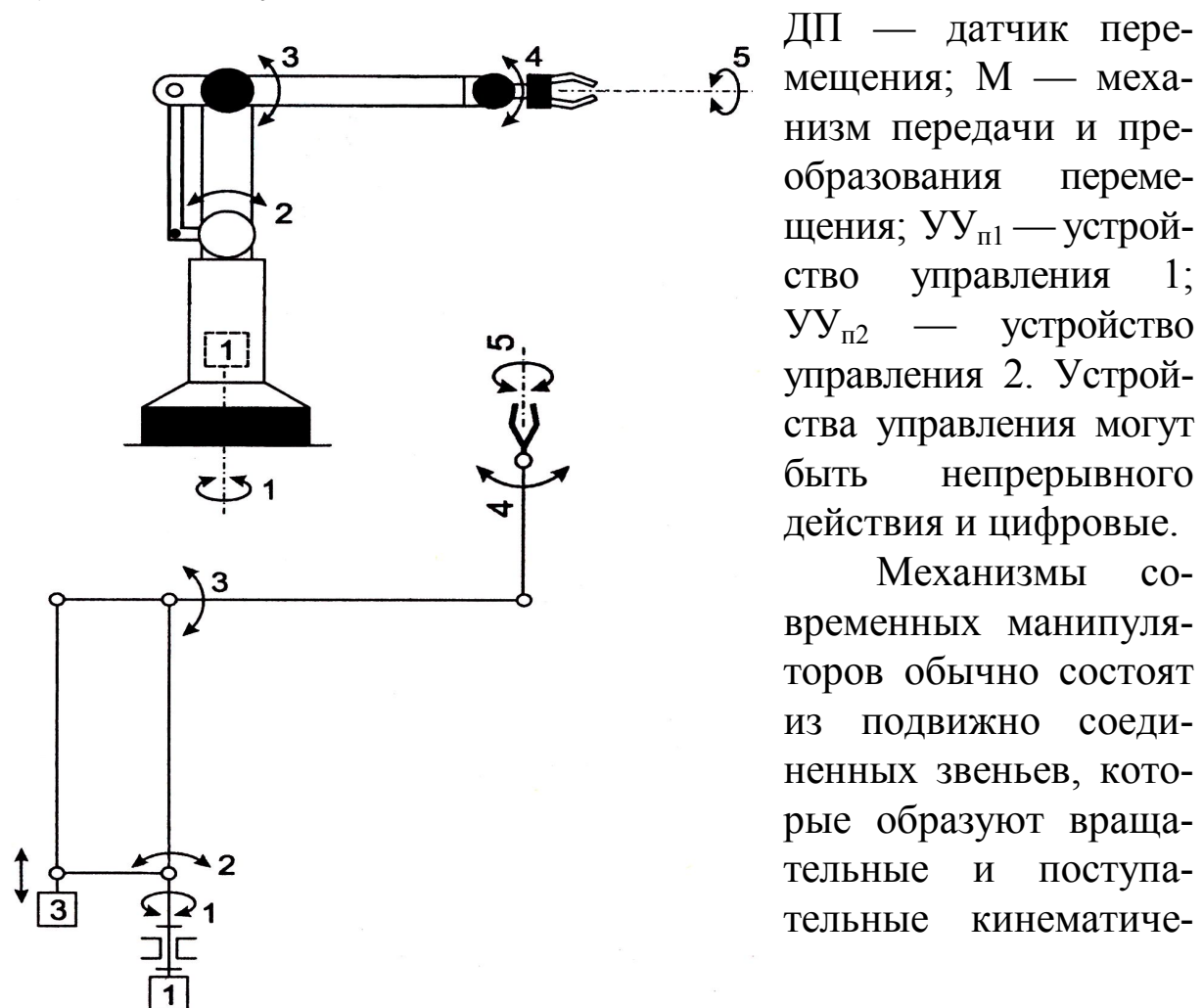


Рис. 2.10 — Типовая схема привода манипулятора

Схема имеет обратную связь по положению и по скорости, которая может применяться для управления скоростью. Включение датчика скорости как показано на рисунке (после двигателя Д) позволяет увеличить сигнал с датчика ДС. В схеме показано:



ДП — датчик перемещения; М — механизм передачи и преобразования перемещения; УУ<sub>п1</sub> — устройство управления 1; УУ<sub>п2</sub> — устройство управления 2. Устройства управления могут быть непрерывного действия и цифровые.

Механизмы современных манипуляторов обычно состоят из подвижно соединенных звеньев, которые образуют вращательные и поступательные кинематиче-

Рис. 2.11 — Схема манипулятора с параллельно соединенными звеньями

ские пары с одной степенью подвижности. Более сложные кинематические схемы манипуляторов содержат параллельно соединенные звенья. На рис. 2.11 показан пример такой схемы.

Механизм, приведенный на рис. 2.11 обеспечивает поступательное движение рабочего органа при повороте шарнира 3 по часовой стрелке, а левая тяга поворачивает в том же направлении шарнир 2, сдвигая рабочий орган вправо с окружности относительно точки 3.

## 2.7 Многозвенные манипуляторы

Многозвенный манипулятор — это манипулятор с несколькими степенями подвижности. Например, в качестве конструкции, обладающей одной степенью подвижности может быть поворот одного звена относительно другого или вращение цилиндрического стержня вокруг собственной оси симметрии, а также возвратно-поступательные движения перемещения цилиндрического стержня вокруг этой оси. Конструкция, приведенная на рис. 2.12 имеет две степени подвижности.

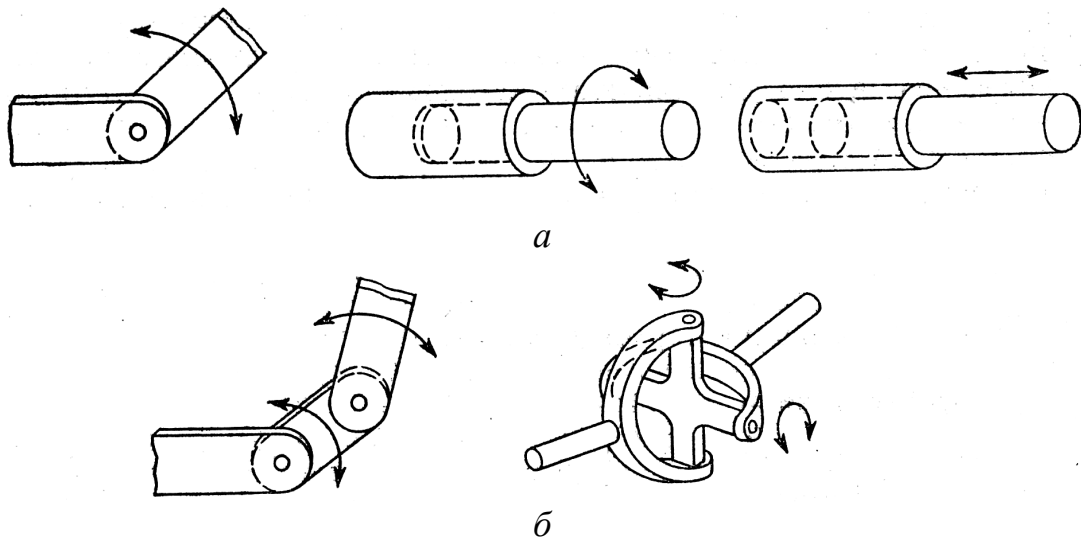


Рис. 2.12 — Манипулятор с двумя степенями подвижности

Промышленные роботы имеют, как правило, большее количество степеней подвижности. В условия реального производства применяются роботы с четырьмя и менее степенями подвижно-

сти. Управление манипуляторами с таким числом степеней подвижности является таким же сложным, как и при управлении манипуляторами с большим числом степеней подвижности. Так при выполнении простейшей операции — перемещение захватного устройства из одной точки в другую требуется выполнить большой объем вычислений.

### 2.7.1 Принципы управления многозвенными манипуляторами

Рассмотрим задачу перемещения захватного устройства из одной точки в другую. Допустим манипулятор имеет всего одну степень подвижности, а для перемещения манипулятора в заданную точку достаточно рассчитать величину поворота  $\Theta$  (рис. 2.13). Более сложная задача стоит когда манипулятору помимо вращательного движения необходимо совершать возвратно-поступательное. Последовательность действий для достижения поставленной цели может быть различной:

1) можно сначала сделать поворот на угол  $\Theta$ , а затем выполнить поступательное перемещение на расстояние  $r$  в радиальном направлении до конечной точки;

2) можно выполнить сначала поступательное движение на ту же величину  $r$ , а достижение конечной точки закончить поворотом на угол  $\Theta$ ;

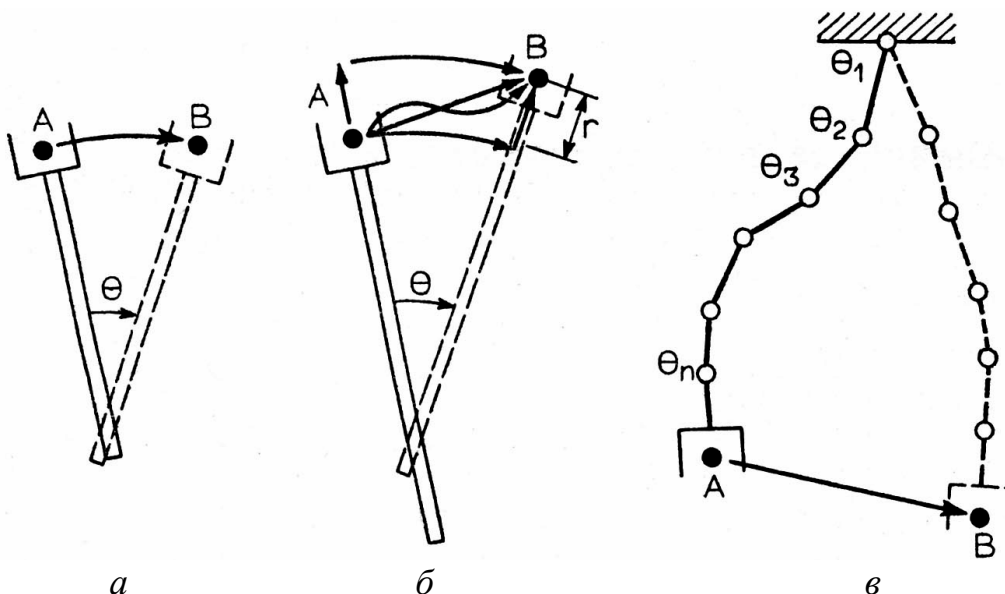


Рис. 2.13 — Простое перемещение манипулятора с одной (а), двумя (б) степенями подвижности, (в) многозвенный манипулятор

3) одновременно выполнить поворот на угол  $\Theta$  и перенос на расстояние  $r$ . Такой метод управления называется позиционным управлением.

4) можно также разбить диапазоны вращения и перемещения на мелкие отрезки и подавая на приводы в определенное время соответствующие сигналы переместить манипулятор в заданную точку. Такой метод управления движением называется контурным управлением.

Методы разбиения диапазонов вращательного  $\Theta$  и линейного  $r$  перемещений на маленькие участки, включая выбор расположения точек, ограничивающие эти участки называется интерполяцией.

Вычисление положения многозвенного манипулятора среди разнообразия кинематических схем манипуляторов промышленных роботов связано с различными системами координат. Приведем основные системы координат.

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

Для расчета положения многозвенного манипулятора применяют два метода расчета — матричный и векторный методы. В основе этих методов лежит принцип преобразования координат с помощью матриц преобразования.

### 2.7.2 Параллельный перенос и вращение координат в векторном методе

Пусть оси исходной прямоугольной системы координат  $x, y, z$ , оси системы координат после операции переноса  $x', y', z'$ , а оси системы полученные в результате вращения  $x_1, y_1, z_1$  (рис. 2.14). Обозначим базисные векторы старой и новой систем координат соответственно  $(i, j, k)$  и  $(i_1, j_1, k_1)$ . **Отложив на осях  $OX, OY, OZ$  в**

положительном направлении отрезки  $OA$ ,  $OB$ ,  $OC$ , равные единице масштаба, получим три вектора (еще они называются основными векторами) и обозначаются соответственно  $i$ ,  $j$ ,  $k$ .

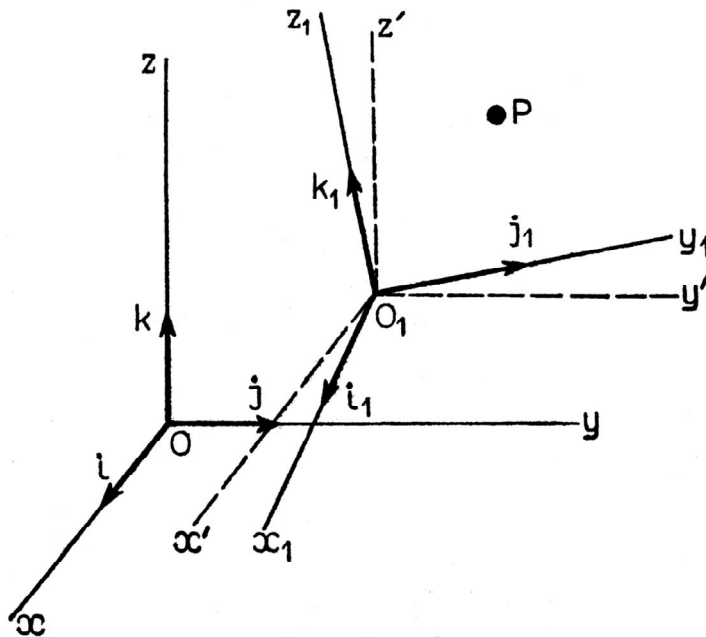


Рис. 2.14 — Параллельный перенос и вращение системы координат

Старую и новую системы координат запишем в следующем виде:

Старая система координат  $\{O; x, y, z\}$ ;

Новая система координат  $\{O_1; x_1, y_1, z_1\}$ .

Точка  $P$  в старой системе имеет координаты  $P(x, y, z)$ , в новой системе  $P(x_1, y_1, z_1)$ . Между координатами существует соотношение вида:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = C_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Переменные  $x'_1$ ,  $y'_1$ ,  $z'_1$  характеризуют величину параллельного переноса вдоль каждой из соответствующих осей при преобразовании систем координат из  $O \rightarrow O_1$ . Т.е. эти переменные



являются координатами точки  $O_1$  (начало новой системы координат  $O_1$ ), выраженными в старой системе координат.

Множитель  $C_1$  называется матрицей преобразования координат, описывающая операцию вращения и состоящая из следующих элементов:

$$C_1 = \begin{bmatrix} (i, i_1) & (j, i_1) & (k, i_1) \\ (i, j_1) & (j, j_1) & (k, j_1) \\ (i, k_1) & (j, k_1) & (k, k_1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $i, i_1$  — скалярное произведение базисных векторов.

Матрицу поворота можно определить как матрицу преобразования трехмерного вектора положения в евклидовом пространстве, переводящую его координаты из повернутой системы отчета  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  в абсолютную систему координат  $OXYZ$ .

Пусть  $(i_x, j_y, k_z)$  и  $(i_{x_1}, j_{y_1}, k_{z_1})$  — единичные векторы, направленные вдоль осей систем  $OXYZ$  и  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  соответственно. Точку  $P$  в пространстве можно определить координатами относительно любой из указанных систем. Предположим, что точка  $P$  фиксирована и неподвижна в системе отсчета  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$ . Тогда в системах координат  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  и  $OXYZ$  точка  $P$  будет иметь соответственно координаты

$$P_{x_1, y_1, z_1} = (P_{x_1}, P_{y_1}, P_{z_1})^T$$

и

$$P_{x, y, z} = (P_x, P_y, P_z)^T. \quad (3)$$

Верхний индекс  $T$ , в обозначении вектора или матрицы, обозначает операцию транспонирования. (Транспонированная матрица, матрица, получающаяся из данной прямоугольной или квадратной матрицы  $A = ||a_{ik}||$  после замены строк соответственно столбцами. Обозначение  $A' = ||a'_{ik}||$ , где  $a'_{ik} = a_{ki}$  для любых  $i$  и  $k$ ).

Задача состоит в том, чтобы определить матрицу  $C_1$ , которая преобразует координаты  $P_{x_1, y_1, z_1}$  в координаты вектора  $P$  в

системе  $OXYZ$  после того, как система  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  будет повернута т.е.

$$P_{xyz} = C_1 P_{x_1, y_1, z_1}. \quad (4)$$

Следует отметить, что физически точка  $P$  вращается вместе с системой координат  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$ .

Из определения компонент вектора имеем

$$P_{x_1, y_1, z_1} = P_{x_1} \cdot i_{x_1} + P_{y_1} \cdot j_{y_1} + P_{z_1} \cdot k_{z_1}, \quad (5)$$

где  $P_{x_1}$ ,  $P_{y_1}$  и  $P_{z_1}$  представляют собой составляющие вектора  $P$  вдоль осей  $OX_1, OY_1$  и  $OZ_1$  соответственно, или проекции вектора  $P$  на эти оси. Используя определение скалярного произведения и равенство (5) получим:

$$\begin{aligned} P_x &= i_x \cdot p = i_x \cdot i_{x_1} \cdot p_{x_1} + i_x \cdot j_{y_1} \cdot p_{y_1} + i_x \cdot k_{z_1} \cdot p_{z_1}, \\ P_y &= j_y \cdot p = j_y \cdot i_{x_1} \cdot p_{x_1} + j_y \cdot j_{y_1} \cdot p_{y_1} + j_y \cdot k_{z_1} \cdot p_{z_1}, \\ P_z &= k_z \cdot p = k_z \cdot i_{x_1} \cdot p_{x_1} + k_z \cdot j_{y_1} \cdot p_{y_1} + k_z \cdot k_{z_1} \cdot p_{z_1} \end{aligned} \quad (6)$$

или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_{x_1} & i_x \cdot j_{y_1} & i_x \cdot k_{z_1} \\ j_y \cdot i_{x_1} & j_y \cdot j_{y_1} & j_y \cdot k_{z_1} \\ k_z \cdot i_{x_1} & k_z \cdot j_{y_1} & k_z \cdot k_{z_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{x_1} \\ P_{y_1} \\ P_{z_1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

С учетом этого выражения матрица  $C_1$  в равенстве (4) примет вид

$$C_1 = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_{x_1} & i_x \cdot j_{y_1} & i_x \cdot k_{z_1} \\ j_y \cdot i_{x_1} & j_y \cdot j_{y_1} & j_y \cdot k_{z_1} \\ k_z \cdot i_{x_1} & k_z \cdot j_{y_1} & k_z \cdot k_{z_1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Аналогично, координаты  $P_{x_1, y_1, z_1}$  можно получить из координат  $P_{x, y, z}$ :

$$P_{x_1, y_1, z_1} = Q \cdot P_{x, y, z}, \quad (9)$$

$$\text{или } \begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{x1}i_x & i_{x1}j_y & i_{x1}k_z \\ j_{y1}i_x & j_{y1}j_y & j_{y1}k_z \\ k_{z1}i_x & k_{z1}j_y & k_{z1}k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Т.к. операция скалярного произведения коммутативна, ( $a + b = b + a$  или  $ab = ba$ ), то из соотношений (8–10) следует

$$Q = C_1^{-1} = C_1^T, \quad (11)$$

$$QC = C_1^T C_1 = C_1^{-1} \cdot C_1 = I_3, \quad (12)$$

где  $I_3$  — единичная матрица размерностью  $3 \times 3$ . Преобразование, определяемое выражением (4) или (9), называется ортогональным преобразованием, а т.к. все векторы, входящие в скалярные произведения, единичные, его также называют ортогональным преобразованием.

Рассмотрим матрицы поворота системы  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  относительно каждой из трех основных осей системы  $OXYZ$ . Если положение системы  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  в пространстве изменяется за счет поворота этой системы на угол  $\alpha$  вокруг оси  $OX$ , то в системе отсчета  $OXYZ$  изменяются и координаты  $(p_x, p_y, p_z)^T$  точки  $P_{x1, y1, z1}$ , имеющей в системе  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  неизменные координаты  $(P_{x1, y1, z1})$ . Соответствующая матрица преобразования  $C_{x, \alpha}$  называется *матрицей поворота* вокруг оси  $OX$  на угол  $\alpha$ . Основываясь на полученных выше результатах, для матрицы  $C_{x, \alpha}$  имеем

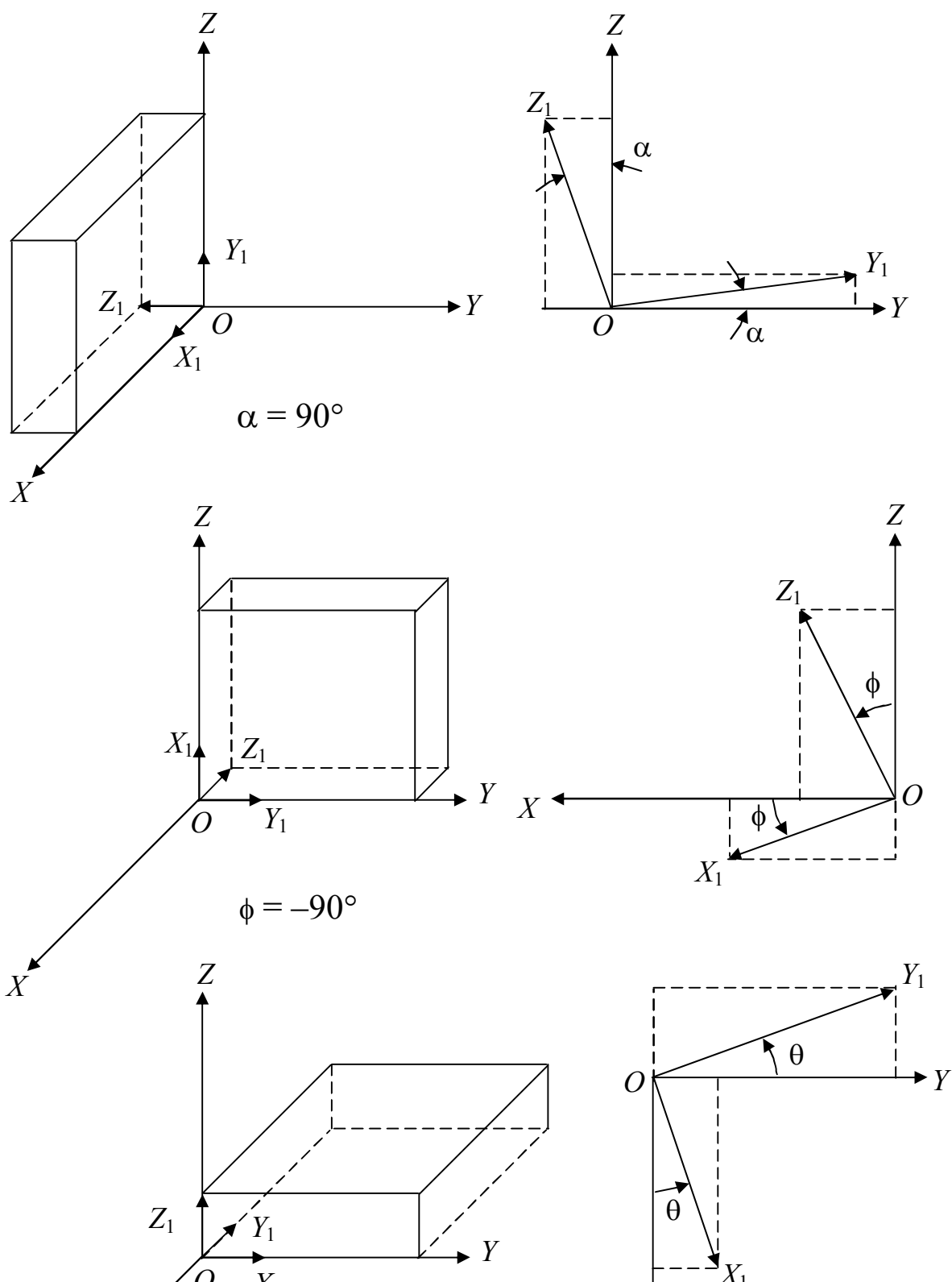
$$P_{x, y, z} = C_{x, \alpha} \cdot P_{x1, y1, z1} \quad (13)$$

причем  $i_x \equiv i_{x1}$ , и

$$C_{x, \alpha} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_{x1} & i_x \cdot j_{y1} & i_x \cdot k_{z1} \\ j_y \cdot i_{x1} & j_y \cdot j_{y1} & j_y \cdot k_{z1} \\ k_z \cdot i_{x1} & k_z \cdot j_{y1} & k_z \cdot k_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Аналогично, трехмерные (размерностью  $3 \times 3$ ) матрицы поворота вокруг оси  $OY$  на угол  $\varphi$  и вокруг оси  $OZ$  на угол  $\theta$  имеют соответственно вид (рис. 2.15) [8]:

$$C_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad C_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$



$$\theta = 90^\circ$$

Рис. 2.15 — Вращающаяся система координат

Матрицы  $C_{x,\alpha}$ ,  $C_{y,\varphi}$  и  $C_{z,\theta}$  называются матрицами элементарных поворотов. Любые другие матрицы конечных поворотов можно получить, используя матрицы элементарных поворотов.

**Пример 1.**

В повернутой системе координат  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  заданы две точки  $a_{x_1,y_1,z_1} = (4, 3, 2)^T$  и  $b_{x_1,y_1,z_1} = (6, 2, 4)^T$ . Требуется определить координаты  $a_{x,y,z}$  и  $b_{x,y,z}$  этих точек в абсолютной системе координат, если система  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  повернута относительно оси  $OZ$  на угол  $60^\circ$ .

*Решение:*  $a_{x,y,z} = C_{z,60^\circ} \cdot a_{x_1,y_1,z_1}$  и  $b_{x,y,z} = C_{z,60^\circ} \cdot b_{x_1,y_1,z_1}$

$$\begin{aligned} a_{x,y,z} &= \begin{bmatrix} 0,500 & -0,866 & 0 \\ 0,866 & 0,500 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 4(0,5) & +3(-0,866) & +2(0) \\ 4(0,866) & +3(0,5) & +2(0) \\ 4(0) & +3(0) & +2(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,598 \\ 4,964 \\ 2,0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$b_{x,y,z} = \begin{bmatrix} 0,500 & -0,866 & 0 \\ 0,866 & 0,500 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 6 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,268 \\ 6,196 \\ 4,0 \end{bmatrix}.$$

Итак:  $a_{x,y,z}$  и  $b_{x,y,z}$  в абсолютной системе координат равны соответственно  $(-0,598, 4,964, 2,0)^T$  и  $(1,268, 6,196, 4,0)^T$ .

### Пример 2.

По известным координатам точек  $a_{x,y,z} = (4, 3, 2)^T$  и  $b_{x,y,z} = (6, 2, 4)^T$  в абсолютной системе отсчета требуется определить соответствующие координаты в системе  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$ , повернутой относительно оси  $OZ$  на  $60^\circ$ .

*Решение:*  $a_{x_1,y_1,z_1} = (C_{z,60^\circ})^T \cdot a_{xyz}$  и  $b_{x_1,y_1,z_1} = (C_{z,60^\circ})^T \cdot b_{xyz}$ ,

$$\begin{aligned}
 a_{x_1,y_1,z_1} &= \begin{bmatrix} 0,500 & 0,866 & 0 \\ -0,866 & 0,500 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 4(0,5) & +(0,866 & +2(0) \\ 4(-0,866) & +3(0,5) & +(2) \\ 4(0) & +3(0) & +2(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,598 \\ -1,964 \\ 2,0 \end{bmatrix}. \\
 b_{x_1,y_1,z_1} &= \begin{bmatrix} 0,500 & 0,866 & 0 \\ -0,866 & 0,500 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 6 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,732 \\ -4,196 \\ 4,0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

## 2.8 Типы сервомеханизмов

### 2.8.1 Электрические сервосистемы

Таким сервосистемам сейчас отводится большое значение. Электрические сервосистемы, уступая гидравлическим в мощности выходного воздействия, обладают таким важным преимуществом, как низкая стоимость, простота конструкции, отсутствие загрязнения рабочего места, низкий уровень шума и высокая надежность.

Исполнительным элементом таких сервосистем является электродвигатель постоянного тока. Такие двигатели обладают хорошей управляемостью и позволяют сравнительно легко добиться высокой точности работы сервосистемы. Схема аналого-



Характерной особенностью приведенной схемы является наличие тахогенератора, который необходим для преобразования скорости вращения в электрический сигнал. Основное назначение тахогенератора состоит в том, чтобы помимо обратной связи по позиции обеспечить в системе управления обратную связь по скорости движения. Системы с такой обратной связью позволяют достичь более плавного приближения манипулятора робота к заданной позиции (рис. 2.17).

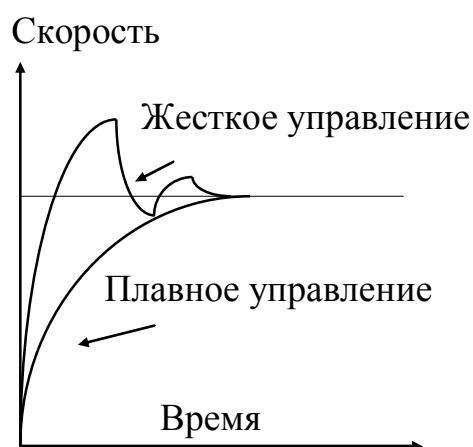


Рис. 2.17 — Влияние обратной связи на движение манипулятора

Для управления серводвигателем постоянного тока во внешний задающий контур включают сервоусилитель. Схема задающего контура с высоким коэффициентом усиления (схема Дарлингтона) приведена на рис. 2.18.



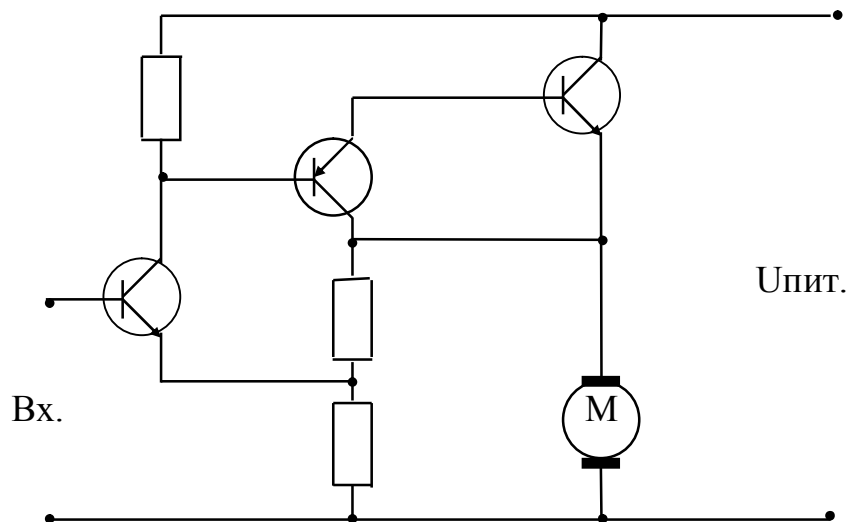


Рис. 2.18 — Схема включения серводвигателя

В этой схеме группу транзисторов можно рассматривать как один составной транзистор. Сама же схема используется для вращения двигателя только в одну сторону. Схема задающего контура для двухсторонних реверсивных систем и рабочая характеристика показаны на рис. 2.19.

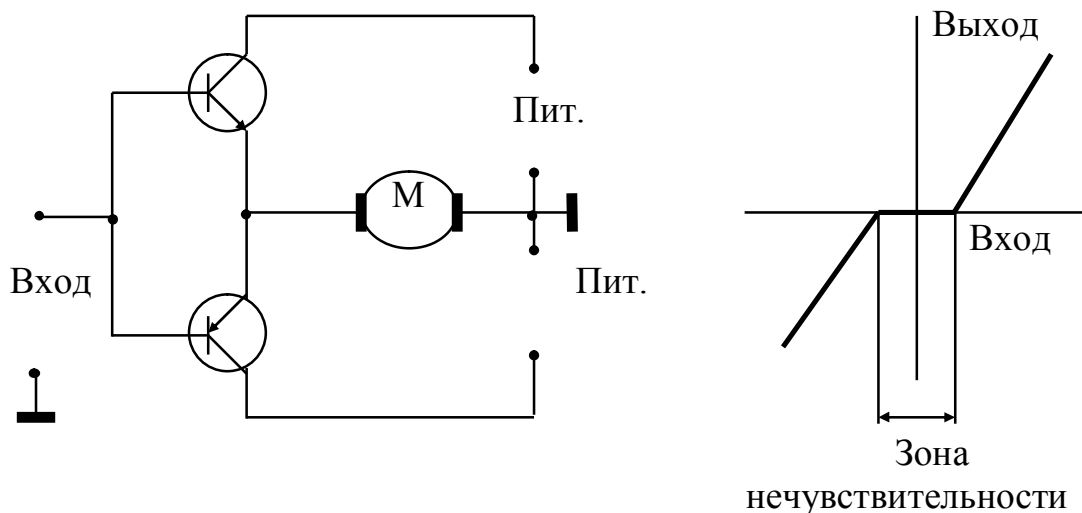


Рис. 2.19 — Схема задающего контура для двухсторонних реверсивных систем

Пока входное напряжение не превысит напряжения отпирания транзисторов, коллекторный ток не течет, поэтому эта схема имеет зону нечувствительности. Чтобы от этого избавиться в схе-

му добавляют цепи смещения, состоящие из одного диода и резистора. Схема подключения цепочки приведена на рис. 2.20.

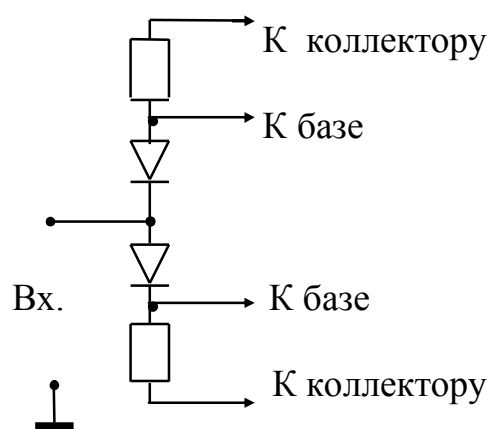


Рис. 2.20 — Схема для устранения зоны нечувствительности

## 2.8.2 Электрогидравлические сервосистемы

В электрогидравлических системах исполнительным устройством служит гидравлический цилиндр и гидравлический двигатель, управляемые с помощью задающего клапана — распределителя.

Сервораспределитель электрогидравлических сервосистем имеет достаточно сложное устройство и детальному изучению его посвящена специальная литература. Поэтому рассмотрим краткую структуру, принцип действия и отличительные особенности электрогидравлических сервосистем. Структура и принцип действия электрогидравлического сервомеханизма приведена на рис. 2.21.

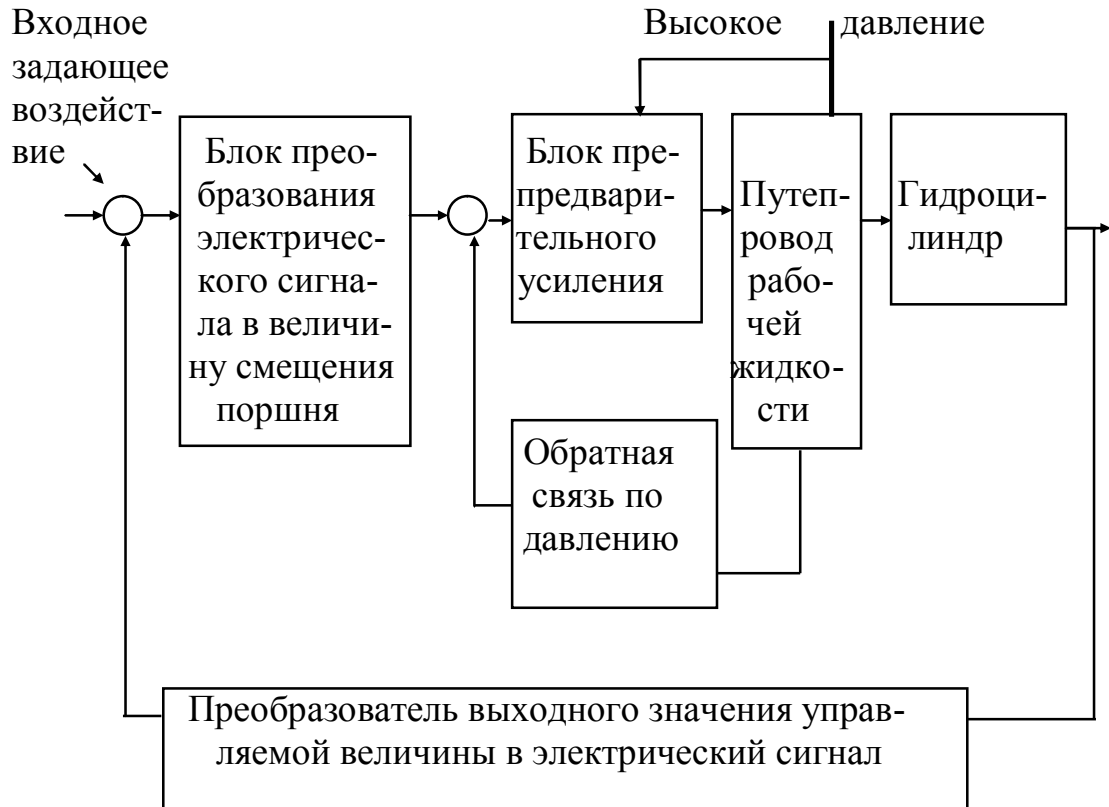


Рис. 2.21 — Структура электрогидравлического сервомеханизма

Для работы гидроцилиндра с золотниковым механизмом нужно преобразовать входной электрический сигнал в сигнал, способный приводить в движение шток гидротолкателя с поршневыми кольцами. Кроме того, необходимо ввести обратные связи по давлению и выходному значению управляемой величины. Функции преобразования входного задающего воздействия в перемещение золотникового механизма выполняют блок преобразования электрического сигнала в величину смещения поршня и блок предварительного усиления.

Принцип управления гидравлическими приводами с помощью задающего сервораспределителя будет более понятным, если предположить, что система состоит из двух подсистем. Первая образована парой гидропривод-золотник, а вторая представляет собой устройство, называемое сопло-заслонка.

Золотник необходим для изменения направления поступления рабочей жидкости. Проанализируем процесс перемещения

тяжелого груза  $W$  с помощью гидроцилиндра, который управляется золотниковым механизмом (рис. 2.22).

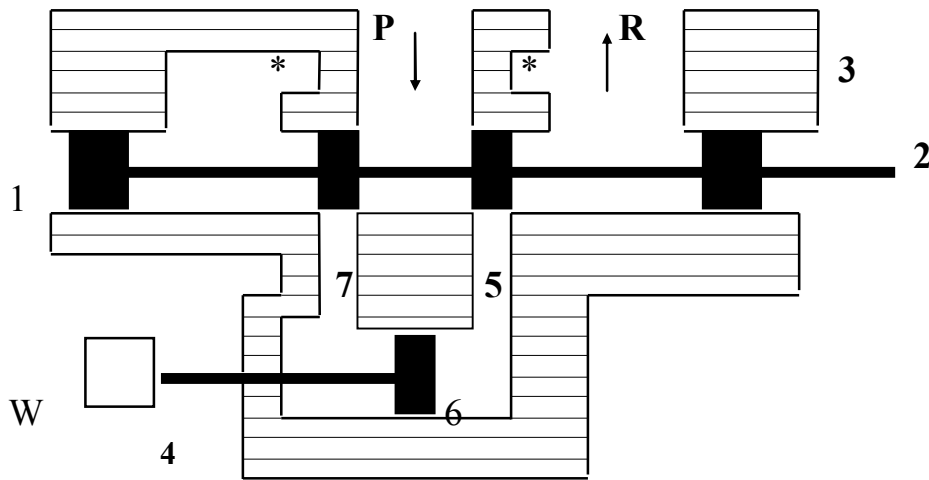


Рис. 2.22 — Схема управления гидравлическим приводом

Шток 2 с жестко насаженными на него поршневыми кольцами 1 занимает нейтральное положение, при котором оба канала оказываются перекрытыми кольцами и давление  $P$  рабочей жидкости на поршень не передается. Если немного сместить поршневые кольца из нейтрального положения в правую сторону, то рабочая жидкость под высоким давлением по впускному каналу 5 поступит по правую сторону от рабочего поршня 6. Рабочий поршень переместится влево, а избыток давления по левую сторону от рабочего поршня уйдет через левый впускной канал 7 и появившийся зазор между поршневыми кольцами и стенкой 4 гидроцилиндра к выходному отверстию  $R$  в корпусе золотникового механизма 3.

При обратном движении шток с поршневыми кольцами проходит через нейтральное положение и затем смещается влево. При этом жидкость под давлением поступает по впускному каналу 7 по левую сторону от рабочего поршня 6, а рабочая жидкость находящаяся по правую сторону от рабочего поршня, как уже было отмечено раньше, поступит в выходное отверстие  $R$ .

Таким образом, подсистема золотник — гидроцилиндр позволяет с помощью незначительного усилия, необходимого для

смещения штока с поршневыми кольцами из нейтрального положения, заставить перемещать вправо или влево груз  $W$ .

Итак, обращаясь к схеме на рисунке 2.21, следует отметить следующее. Для работы гидроцилиндра с золотниковым механизмом нужно преобразовать входной электрический сигнал в сигнал, способный приводить в движение шток гидротолкателя с поршневыми кольцами. Кроме того, необходимо ввести обратные связи по давлению и выходному значению управляемой величины. Функции преобразователя в данной схеме выполняют блок преобразования электрического сигнала в величину смещения поршня и блок предварительного усиления.

### **2.8.3 Пневматические сервосистемы**

Пневматические сервосистемы в качестве приводов промышленных роботов используются реже, чем электрические или электрогидравлические из-за невысокой точности позиционирования, малой выходной мощности, большого количества фрикционных и других нелинейных элементов.

В робототехнике пневматические устройства используются в качестве простых приводных элементов. В частности их удобно применять для управления открытием — закрытием захватного механизма, а также в качестве приводов для простых роботов, к которым не предъявляются высокие требования к точности позиционирования.

Достоинства пневматических сервосистем — отсутствие загрязнения рабочего места, простота обслуживания, плавность перемещений, позволяют применять такие сервосистемы не только в роботостроении, но и в летательных аппаратах.

Структура пневматического сервораспределителя показана на рис. 2.23.

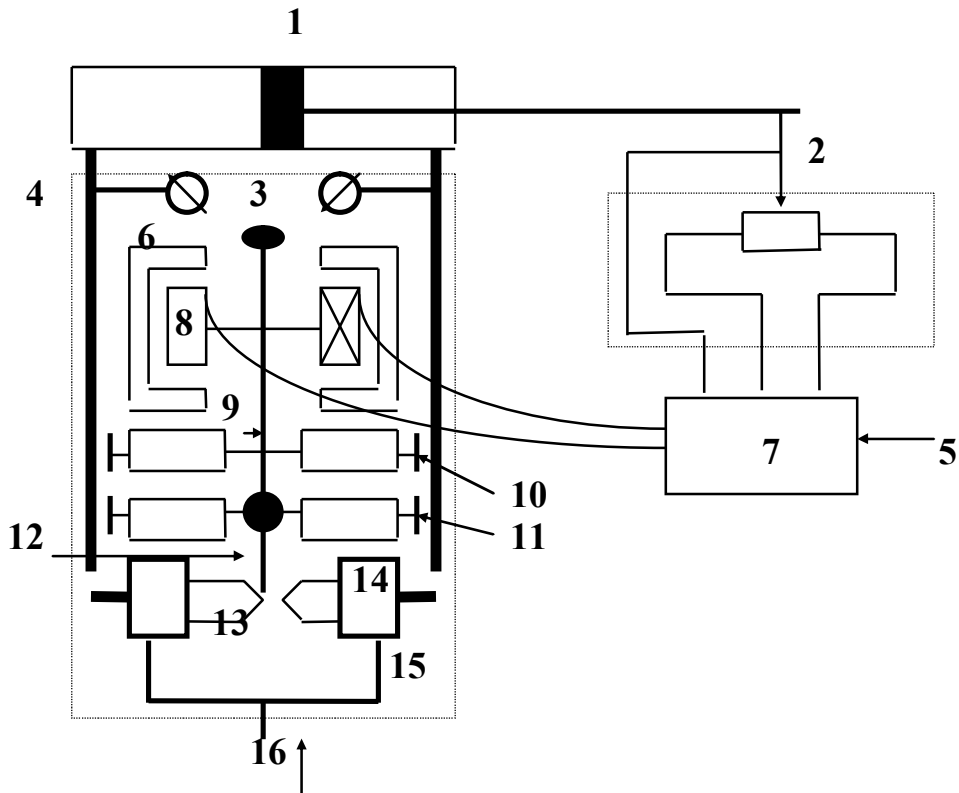


Рис. 2.23 — Структура пневматического сервораспределителя

Рассмотрим процессы при движении поршня пневмоцилиндра 1. Сжатый воздух поступает по каналу 16 в правый или левый релейные блоки 14 сервораспределителя 15.

При появлении сигнала на входе 5 сервоусилителя 7, на выходе последнего появляется электрический сигнал, который поступает на обмотку сердечника 8. Сердечник вместе с балансиром 9 отклоняется в магнитном поле постоянного магнита 6 по окружности с радиусом, выходящим из опорной точки 3. Заслонка 12 и механически связанное с ней сопло 13 релейного блока 14 переключают направление воздуха в правый или левый воздушный каналы, заставляя перемещаться поршни пневмоцилиндра в соответствующую сторону. Давление в воздушном канале регистрируется измерителем давления 4. Обратная связь в системе осуществляется с помощью датчика 2.

Пневматические сервосистемы пока уступают гидравлическим, однако использование специализированных пневматических систем будет выгодно, если в разработках будет учтен основной негативный момент — большая сжимаемость воздуха (газа).

## 2.8.4 Программируемые сервосистемы

В программируемых сервосистемах манипуляторы управляются компьютером. При этом в управляющем контуре в каждой степени подвижности работает компьютер со специальным программным обеспечением. В результате компьютер берет на себя обязанности расчета необходимых корректирующих воздействий на приводы включая повышение точности управления.

Приведенный момент инерции для каждой степени подвижности существенно изменяется при изменении конфигурации всего манипулятора. Если компьютер (процессор) будет непрерывно вычислять величину приведенного момента инерции для текущей конфигурации манипулятора и каждое значение умножать на коэффициент передачи сервосистемы, значение управляющего воздействия не будет зависеть от текущей конфигурации манипулятора.

От конфигурации манипулятора зависит также момент сил, обусловленный собственной массой манипулятора и являющийся главной составляющей суммарного момента возмущающих воздействий. И если дополнительно вычислять величину изменения момента силы собственной массы и добавлять ее к отрицательной величине суммарного момента силы тяжести, то влияние силы тяжести исчезнет, а значит уменьшатся до минимума ошибки позиционирования.

## 3 СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

В системах управления используются три фундаментальных принципа: разомкнутого управления, компенсации и обратной связи.

Принцип разомкнутого управления реализуется только на основе желаемого алгоритма поведения управляемого объекта и не учитывает появление внешних возмущающих воздействий. Понятно, что такие воздействия приводят к неконтролируемым отклонениям в процессе функционирования объекта. Эти недостатки, присущие принципу разомкнутого управления (отсутствие контроля за состоянием параметров объекта) не мешают использовать этот принцип в робототехнических системах. По разомкнутому принципу построена, например, система для регулирования скорости вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения (рис. 3.1).

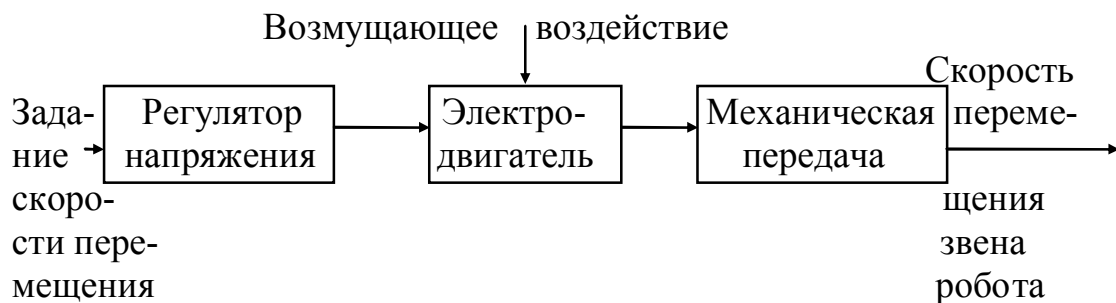


Рис. 3.1 — Регулирование скорости вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

Известно, что для такого типа двигателя скорость вращения выходного вала пропорциональна напряжению, приложенному к якорю. Таким образом, подавая на двигатель постоянного тока напряжение желаемой величины, можно управлять скоростью вращения выходного вала и как следствие, скоростью вращения звена робота. Однако, если на данное звено действуют внешние силы, то скорость вращения вала двигателя будет существенно отличаться от заданной.

Принцип управления по возмущению или принцип компенсации, может использоваться в системе разомкнутого типа, когда существует возмущающее воздействие, при этом имеется устройство, которое компенсирует отклонение регулируемого параметра, вызванного возмущением. На рис. 3.2 показан пример управления по возмущению на примере управления скоростью звена робота.



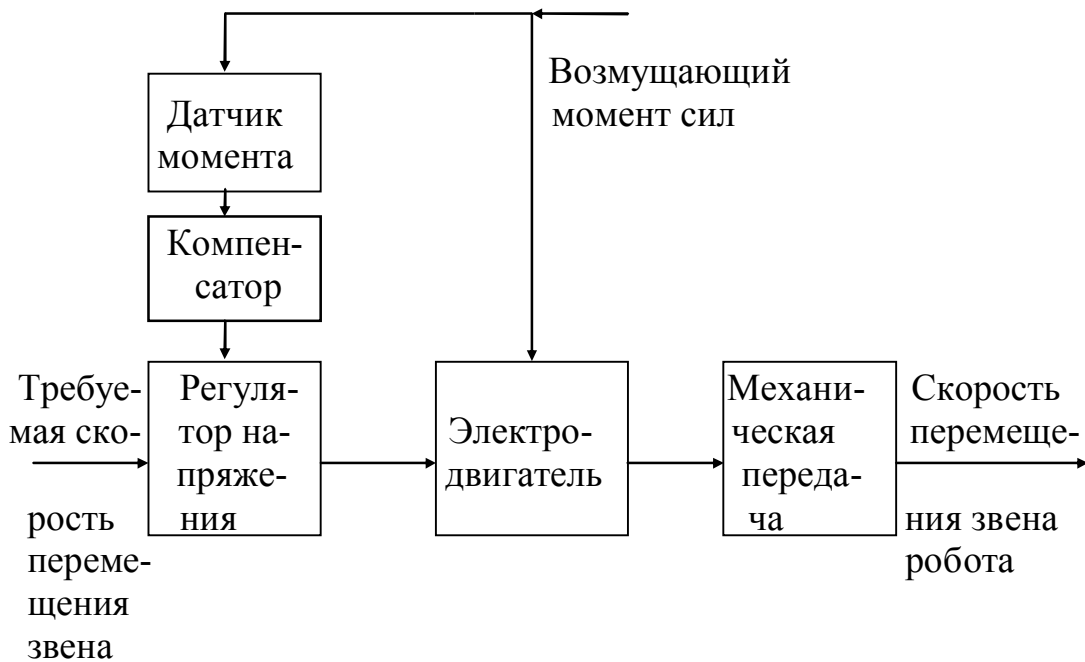


Рис. 3.2 — Схема с компенсатором

Система, приведенная на рис. 3.2 отличается от предыдущей наличием компенсатора и датчика момента сил. С помощью компенсатора можно корректировать алгоритм управления и таким образом уменьшить влияние датчика на процесс регулирования угловой скорости звена. Следует отметить, что в данной системе удастся компенсировать влияние на процесс регулирования воздействия, которое измеряется датчиком, а остальные воздействия вызывают неконтролируемые отклонения.

Одним из важнейших в теории управления является принцип обратной связи. Главным признаком таких систем управления является измерение регулируемого параметра и использование полученной информации при формировании закона управления.

На рис. 3.3 приведена система управления скоростью звена робота, но в нее добавлен датчик для измерения скорости вращения выходного вала, на котором закреплено звено робота. Сравнение требуемого значения скорости с действительным осуществляется специальным сравнивающим устройством.

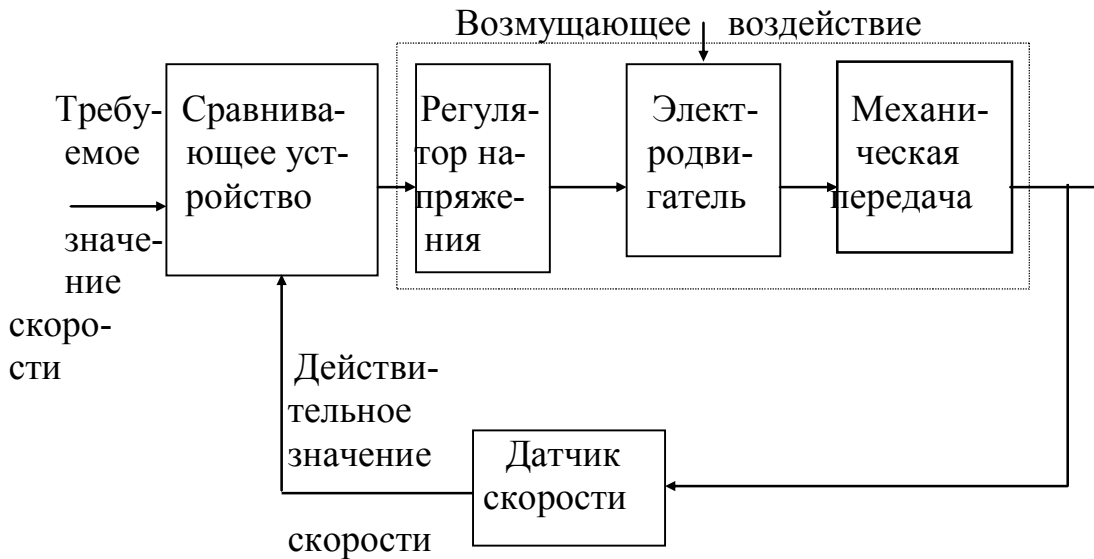


Рис. 3.3 — Схема с датчиком для измерения скорости вращения выходного вала

В результате алгоритм управления напряжением на якоре электродвигателя может быть организован таким образом, чтобы разность между требуемым и действительными значениями скорости была минимальна.

### 3.1 Структура системы программного управления

Системы программного управления промышленных роботов подразделяются на системы циклового, позиционного и контурного управления.

Системы циклового управления имеют малое число точек позиционирования и чаще всего они просто переключают движение манипулятора по каждой степени подвижности от упора до упора под действием сжатого воздуха (подача заготовки под пресс).

Системы позиционного управления имеют большое число программируемых положений точек, через которые должен пройти схват манипулятора в процессе движения.

Системы контурного управления имеют следящие приводы по каждой степени подвижности (следящие системы с обратной связью). Поэтому при совместной работе степеней подвижности схват манипулятора совершает плавное движение по запрограммированным непрерывным траекториям и позиционируется в лю-

бой точке рабочей зоны. Имеются также смешанные позиционно — контурные системы.

Существует два основных способа программирования роботов — программирование расчетным путем и программирование путем обучения. При программировании расчетным путем заранее производится расчет программы, затем программа заносится в память микро — ЭВМ робота. Может быть заложено несколько программ и перепрограммирование робота сводится к переключению программ.

Программирование путем обучения производится человеком — оператором с помощью непосредственного механического перемещения манипулятора рукой человека.

Общая структура систем управления приведена на рис. 3.4.

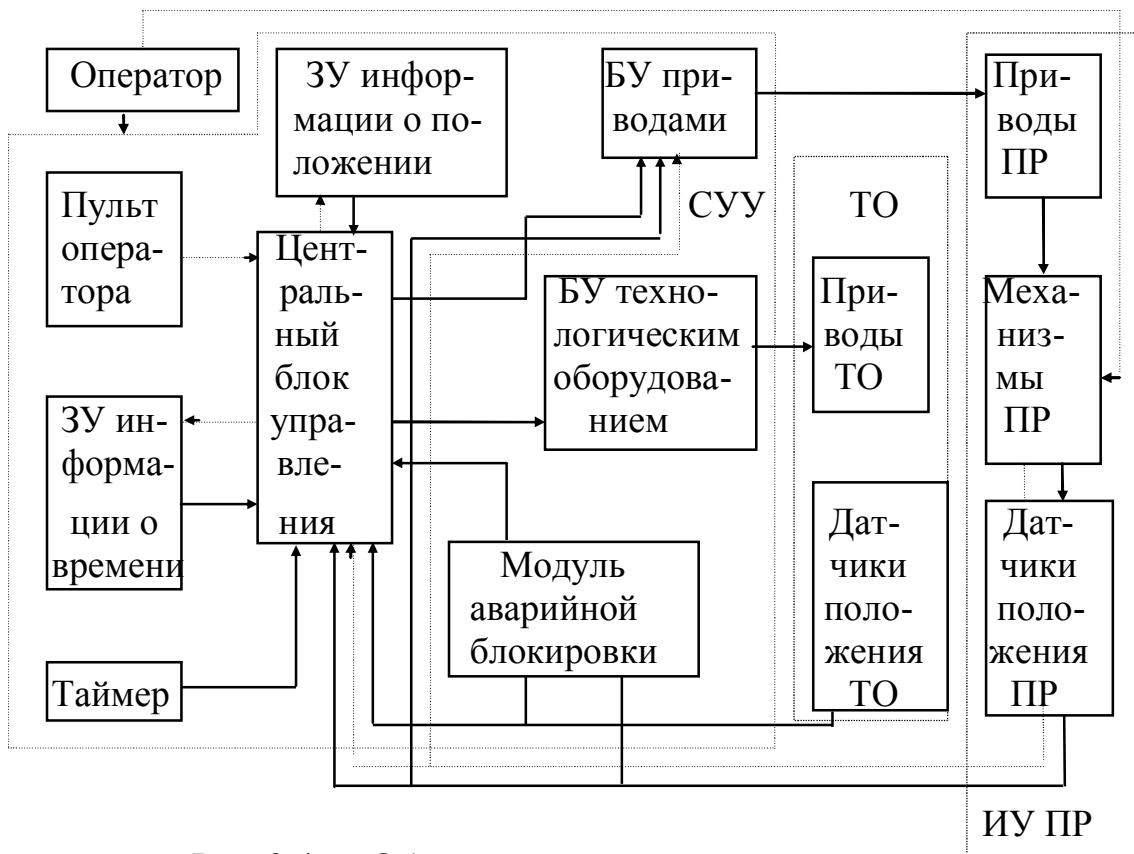


Рис. 3.4 — Общая структура систем управления

В приведенной структуре показаны два режима работы, режим обучения отмеченный пунктирной линией и программный режим, выделенный сплошной линией. На рисунке обозначено: ПР — промышленный робот, ЗУ — запоминающее устройство, БУ — блок управления, СУУ — система устройств управления,

ТО — технологическое оборудование, ИУ ПР — исполнительное устройство промышленного робота.

Через центральный блок управления оператор может задавать один из режимов работы: **ШАГ, ОБУЧЕНИЕ, ЦИКЛ, АВТОМАТ**. Информация о состоянии манипулятора фиксируется на пульте оператора. В режиме **ШАГ И ЦИКЛ** оператор может вызвать из памяти одну команду или несколько (цикл команд). В автоматическом режиме система включается на многократную обработку программы в процессе работы робота в автоматическом режиме. Таймер является задатчиком временных интервалов, заложенных в программе. Датчики положения ПР и ТО служат для передачи информации о фактическом положении объектов в систему управления.

Модуль аварийной блокировки работает по сигналам датчиков положения и технологического оборудования при недопустимых отклонениях от заданной программы.

Компоновка системы может изменяться в зависимости от конструкции робота. В качестве примера приведем схему блока управления для циклового управления манипуляторами и технологическим оборудованием промышленного робота типа «ГРАНИТ». Структурная схема контроллера приведена на рис. 3.5.

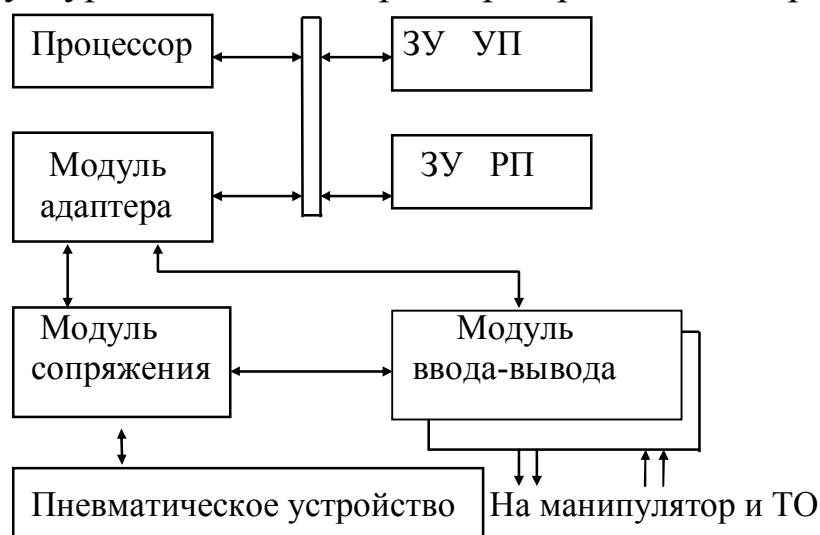


Рис. 3.5 — Структурная схема контроллера

На рисунке показано: ЗУ УП — модуль памяти управляющей программы, ЗУ РП — модуль памяти рабочей программы.

После включения системы процессор производит внутреннюю диагностику всех узлов контроллера и затем в зависимости

от заданного режима переходит на программу работы в наладочном, шаговом, автоматическом режимах или на подпрограмму программирования памяти рабочей программы.

Управляющий сигнал из контроллера поступает через адаптер на модуль сопряжения. Усиленный модулем сигнал подается на пневматическое устройство. При этом включается электромагнит и воздух поступает в один из модулей манипулятора. Манипулятор начинает двигаться. При подходе подвижного звена манипулятора к конечному положению срабатывает демпфирующее устройство, скорость гасится и манипулятор останавливается и ждет появления нового командного сигнала.

При более сложных перемещениях манипулятора применяются многоточечные позиционные системы управления промышленными роботами. В таких системах применяются как замкнутые системы управления с датчиками обратной связи по положению, так и разомкнутые. В качестве примера рассмотрим устройство позиционного управления роботом для дуговой сварки (рис. 3.6).

В режиме обучения оператор с помощью пульта оператора при управлении движением звеньев робота посылает определенное количество импульсов в реверсивные счетчики координат. При этом в счетчиках формируется определенный код, который поступает на цифроаналоговый преобразователь, а затем на компаратор. В компараторе этот сигнал сравнивается со значением напряжения датчика, измеряющего фактическое положение звена. При рассогласовании электроприводы робота отрабатывают разностный сигнал, а звенья робота выходят в нужное положение. С помощью задатчика технологических команд, находящегося на пульте обучения оператора, оператор формирует данные о параметрах сварки, скорости движения манипулятора и необходимых блокировках. Информация одного кадра содержится в регистрах координат и технологическом регистре и может быть передана последовательным кодом на устройство ввода-вывода. Дешифратор необходим для преобразования технологических команд и информации о необходимой скорости движения каждой

степени подвижности в сигналы для управления блоком сварочного оборудования и усилителем приводов.

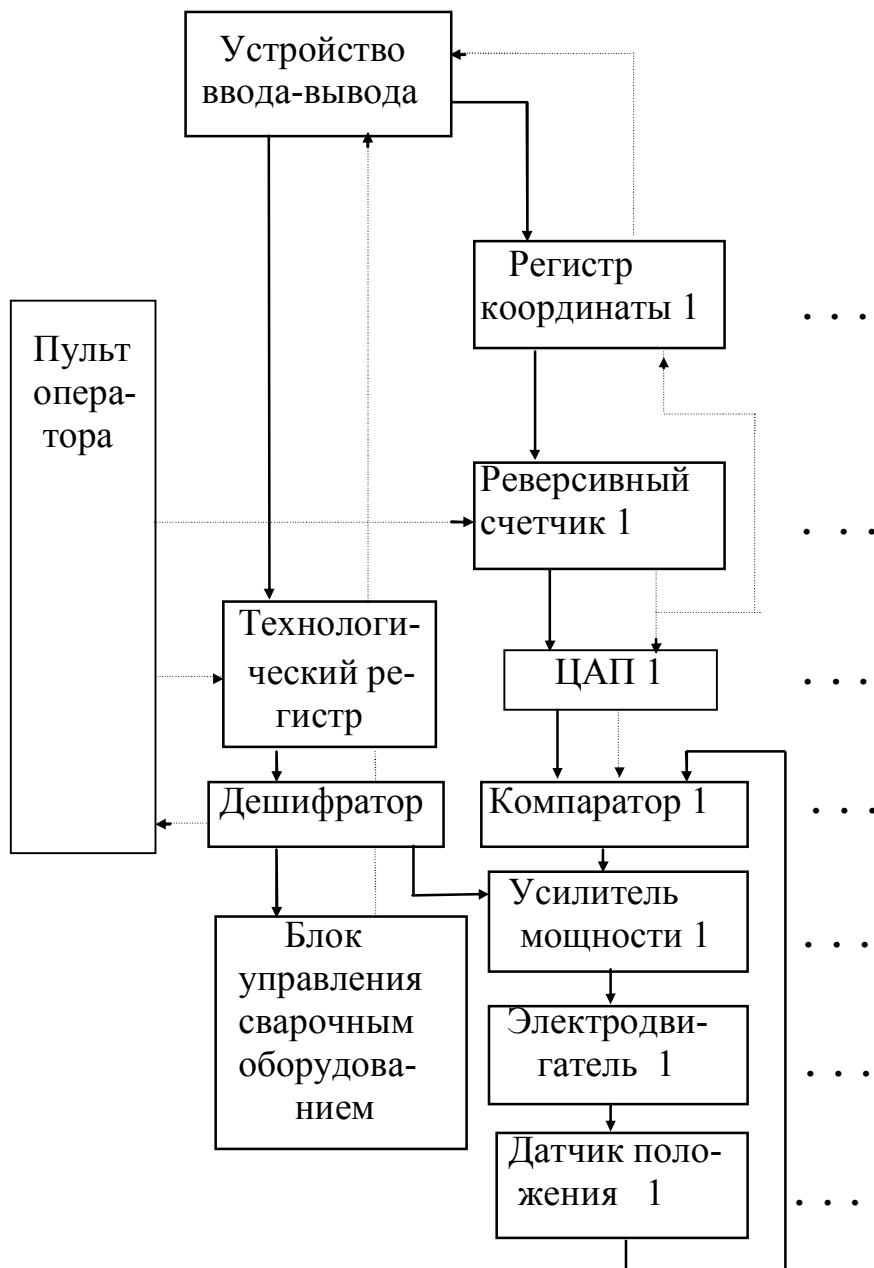


Рис. 3.6 — Устройство позиционного управления роботом для дуговой сварки

На рисунке показан пунктирной линией режим обучения, а сплошной — программы.

В приведенной структурной схеме показано управление по одной координате, а именно по первой. При увеличении числа координат пропорционально усложняется схема позиционной системы управления.

Контурные системы управления обеспечивают синхронную и согласованную обработку заданных траекторий всеми степенями подвижности манипулятора. Равномерное и непрерывное движение схвата манипулятора или инструмента необходимо, например, при автоматизации таких операций, как дуговая сварка, окраска, абразивная зачистка облоя, а также для сложных сборочных работ.

Существует два способа построения устройств контурного управления роботами. В первом способе информация об изменении положения каждой степени подвижности во времени записывается в память. При втором способе конечное число координат точек, принадлежащих желаемой траектории движения схвата или рабочего инструмента также записывается в память, а затем генерируется непрерывная траектория, соединяющая эти точки посредством интерполяции по заданному закону. На рис. 3.7 приведена структурная схема системы контурного управления типа «РОБОКОНТ».

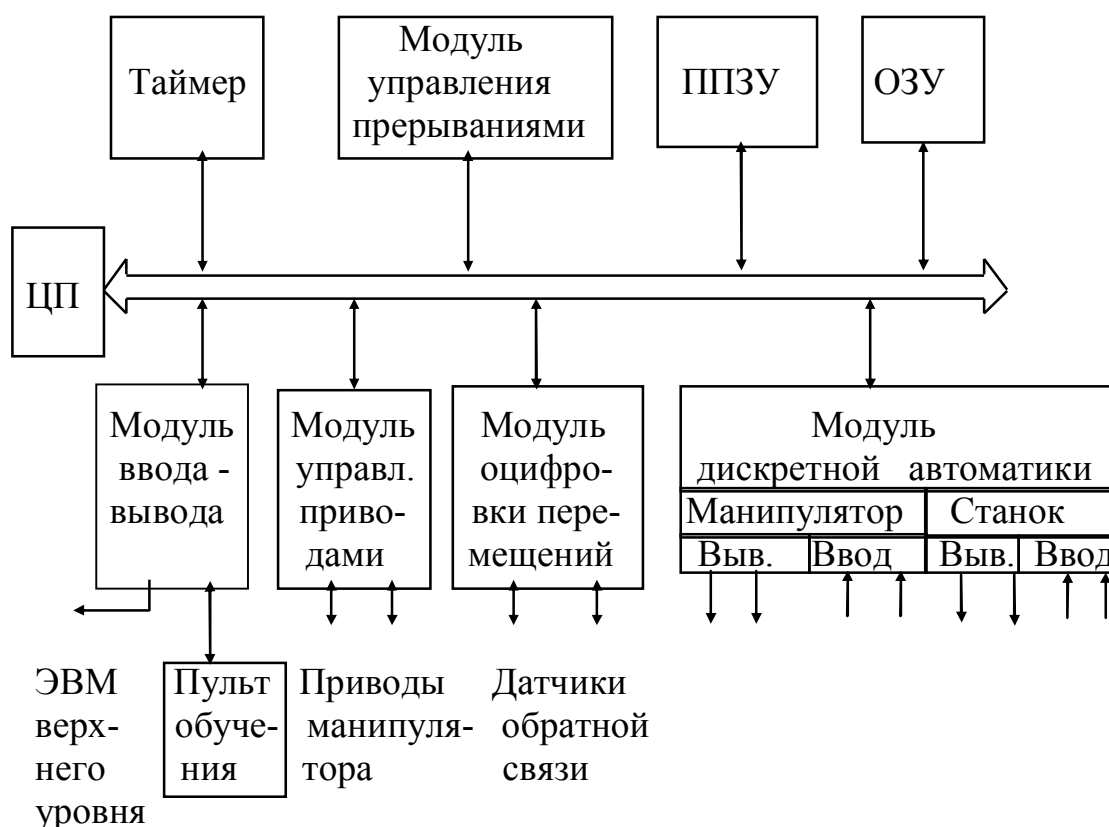


Рис. 3.7 — Структурная схема системы «РОБОКОНТ»

На рисунке обозначено: ЦП — центральный процессор, ППЗУ — постоянное запоминающее устройство, ОЗУ — опера-

тивное запоминающее устройство. Эта система управления является устройством программного управления промышленными манипуляторами роботов М20П, М10П, которые применяются для обслуживания станков в металлообрабатывающем производстве. Устройство выполнено на базе процессора К1810ВМ86.

Система построена в основном из модулей, знакомых читателю из пройденных курсов. Необходимо отметить назначение некоторых специальных модулей:

- модуль оцифровки перемещений необходим для согласования выходных сигналов датчиков обратной связи с системной магистралью;

- модуль дискретной автоматики обеспечивает связь системы управления с внешним технологическим оборудованием.

Программное обеспечение системы управления выполняет следующие функции:

- диагностику и настройку параметров;
- обучение робота и редактирование рабочей программы;
- исполнение рабочей программы;
- связь с ЭВМ верхнего уровня.

### **3.2 Промышленный робот РМ 104**

Промышленный робот РМ 104 относится к роботам первого поколения и предназначен для работы в гибких производственных модулях и решения следующих технологических задач:

- загрузка-разгрузка деталями металлорежущих станков с ЧПУ;
- управление работой станка с ЧПУ, вспомогательным технологическим оборудованием и диагностика их исходного состояния;

- организация обмена информацией с библиотекой программ ЭВМ верхнего уровня;

- оперативная подготовка и корректировка управляющих программ робота и станка посредством клавиатуры и алфавитно-цифрового дисплея;

- взаимодействие с цеховой транспортной системой и обслуживание пассивных накопителей сотового типа размерами 600×800 мм.



Обобщенная структурная схема системы управления робота-манипулятора РМ 104 приведен на рис. 3.8.

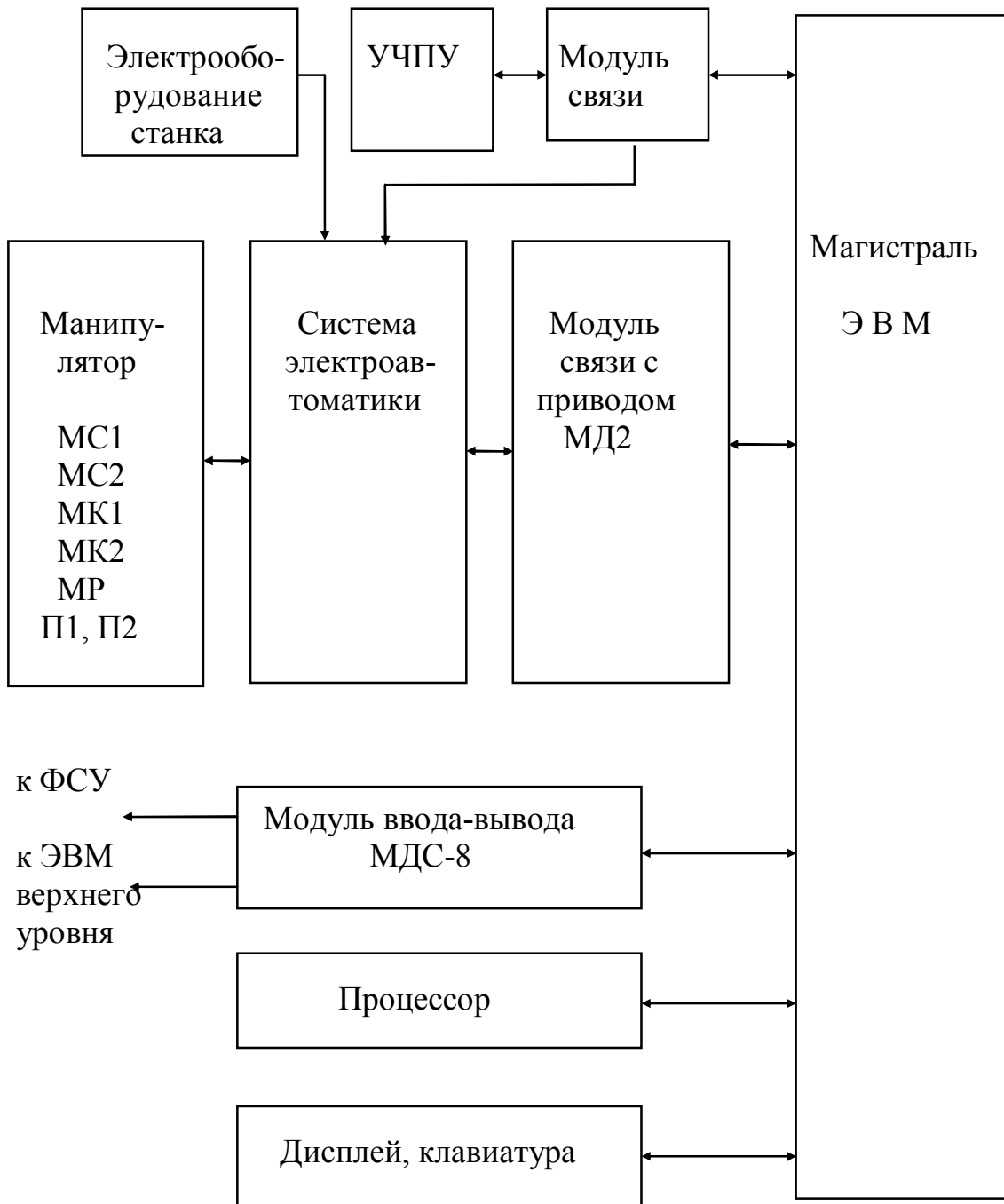


Рис. 3.8 — Обобщенная структурная схема СУ робота-манипулятора РМ 104

Система управления робота-манипулятора представляет собой комплекс программных и аппаратных средств, предназначенный для управления манипулятором и технологическим оборудованием.

Функционально систему управления можно разделить на две подсистемы, подсистему автоматики и управляющую ЭВМ [5].

Управляющая ЭВМ по программе, хранящейся в памяти системы выполняет следующие функции:

- управление движением составных частей манипулятора;
- управление дополнительным технологическим оборудованием, синхронизацией его работы с действиями робота;
- обмен информацией с ЭВМ верхнего уровня;
- осуществление диалога оператор-система;
- коррекции и задания технологических программ и станка.

Главным модулем системы управления робота является процессор. Он состоит из программируемого контроллера «Кедр-1» и памяти ОЗУ-16, а также ПЗУ-10. Алфавитно-цифровой дисплей и сенсорная клавиатура предназначены для обеспечения диалога оператора с системой управления и выполнены отдельным блоком, расположенным на передней панели стойки робототехнического комплекса (РТК). Модуль ввода-вывода обеспечивает связь РТК с ЭВМ верхнего уровня и фотосчитывающим устройством. Перемещение манипулятора по всем степеням подвижности обеспечивается модулями схвата (МС1, МС2), кисти (МК1, МК2), руки (МР) и поворота (П1, П2). Система электроавтоматики, в состав которой входит блок реле, обеспечивает связь модулей движения с манипулятором. Модуль связи включает устройства, обеспечивающие работу УЧПУ и системы электроавтоматики.

Функции системы управления выполняют семь независимых каналов управления степенями подвижности. Управление этими каналами осуществляется по программе, хранящейся в памяти системы и обеспечивается аппаратурой общесистемного назначения.

Рассмотрим работу одного из таких каналов управления (рис. 3.9). Он состоит из трех частей:

- объекта управления с датчиком грубого нуля, тормозом и аварийными концевыми выключателями;
- модуля движения МД2;
- бесконтактного электропривода с отрицательной обратной связью по скорости.

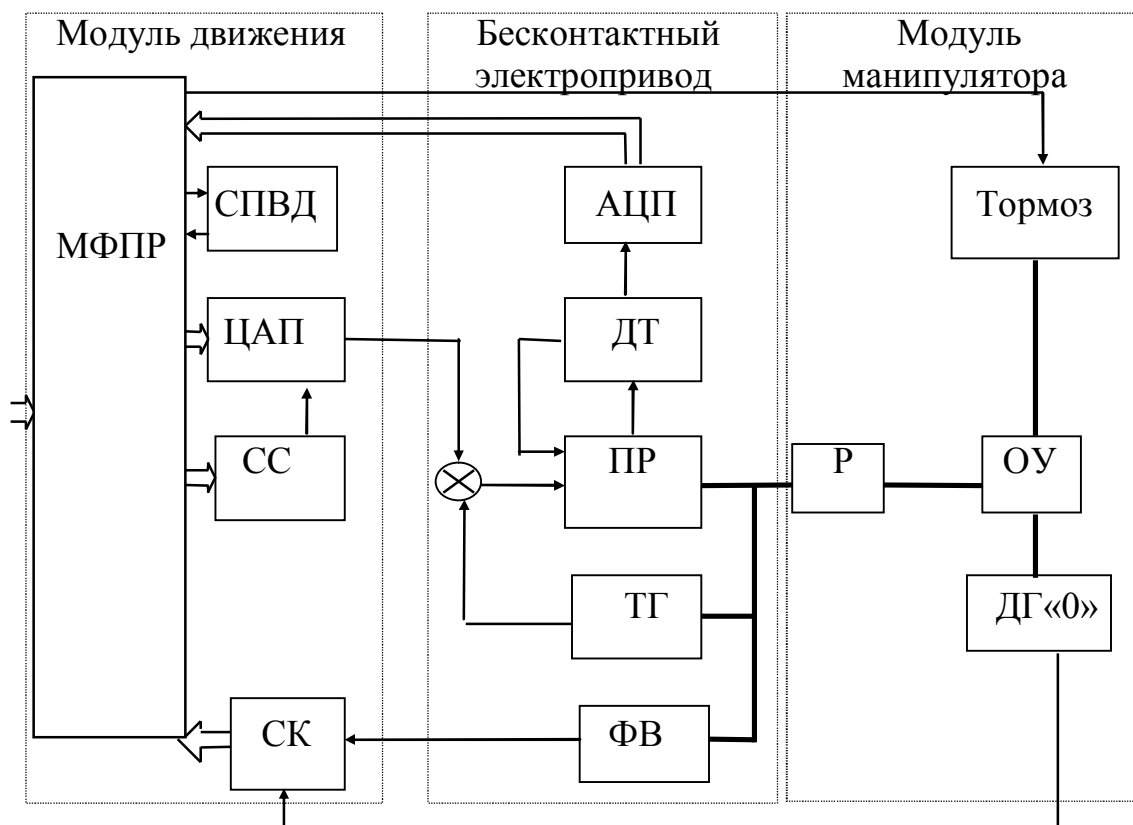


Рис. 3.9 — Схема одного канала управления степенью подвижности

Сокращенные обозначения, которыми обозначены отдельные блоки и их назначение следующие:

- МФПР выполняет роль интерфейса между магистралью КАМАК и остальными узлами модуля;
- ЦАП осуществляет преобразование десятиразрядного параллельного кода в аналоговый сигнал;
- счетчик координат (СК) измеряет разность фаз между питающей и выходной частотами фазовращателя и накапливает результат измерения в 16 разрядном счетчике;
- схема сравнения (СС) предназначена для выдачи сигналов «больше», «меньше», «равно» по результатам сравнения за-

данного в МФПР 16 разрядного кода с параллельным кодом счетчика координат;

- схема приема и выдачи дискретных сигналов (СПВД) необходима для приема информации с аварийных концевых выключателей положения, сигналов об аварийном состоянии привода и 8 разрядного кода с АЦП для выдачи управляющих сигналов на привод типа «включить», «выключить привод», на тормоз «включить тормоз»;

- преобразователь с двигателем (ПР) осуществляет преобразование электрической энергии во вращательное движение вала двигателя со скоростью, пропорциональной заданному входному управляющему воздействию;

- фазовращатель (ФВ) определяет положение ротора двигателя;

- тахогенератор (ТГ) нужен для определения реальной скорости вращения вала двигателя;

- датчик тока (ДТ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) необходимы для измерения тока в цепи статора и преобразования его в 8 разрядный код.

В модуле манипулятора символом Р обозначен редуктор, ОУ — объект управления, Т — тормоз и ДГ«0» — датчик грубого нуля.

Канал управления имеет 4 режима работы:

- режим обнуления;
- режим поддержания в заданной координате;
- режим движения к заданной координате;
- режим движения по усилию.

Для реализации этих режимов в системе управления существуют контуры управления по скорости, положению и току.

Контур управления по скорости существует только в приводе и в него входят преобразователь — тахогенератор — преобразователь.

Контур управления по положению МД2 (ЦАП) — преобразователь — ФВ-МД2 (счетчик координат, схема сравнения). В зависимости от режима работы канала, замыкание контура управления по положению происходит двумя способами. В режиме поддержания в заданной координате замыкание произво-

дится аппаратно в модуле движения. В режиме движения к заданной координате контур управления замыкается программно. Контур управления по току образует МД2 (ЦАП) — преобразователь — датчик тока с АЦП-МД2 (режим приема дискретных сигналов). Контур управления по току замыкается программно.

Рассмотрим работу канала в различных режимах. Режим обнуления необходим для приведения состояния счетчика координат в соответствующее реальному положению робота. В этом режиме на привод выдается управляющее воздействие до тех пор, пока не включится датчик грубого нуля, по которому счетчик координат обнуляется.

Режим поддержания в заданной координате позволяет автоматически устранить дрейф привода при нулевом управляющем воздействии, не включая программной обратной связи и управления данным приводом. На схему сравнения выдается двоичный параллельный код координаты заданной точки, замыкание контура управления по положению производится путем включения аппаратной связи между схемой сравнения и ЦАП модуля МД2. Схема сравнения выдает в ЦАП сигнал управления в случае, когда коды заданной и текущей координаты не равны. На привод в этом случае подается управляющее воздействие, знак которого противоположен знаку сравнения. Управляющее воздействие отсутствует в случае равенства кодов.

В режиме движения к заданной координате аппаратная обратная связь по положению отключается. Замыкание контура управления по положению осуществляется программно, причем имеется возможность выдачи модулем запроса по достижению заданной координаты, что освобождает процессор от постоянного слежения за ней. Это позволяет организовать гибкую организацию управления роботом.

Режим движения по усилию необходим для контроля тока статора двигателя. В работе этот режим используется для адаптации усилия сжатия детали схватом.

**Функциональные схемы электроприводов** промышленного робота РМ 104 строятся по одной из схем (рис. 3.10, 3.11.).

На рис. 3.10 приведена схема привода с регулируемой скоростью вращения двигателя.

В схеме регулирование скорости вращения двигателя происходит изменением напряжения его питания посредством широтно-импульсной модуляции. Здесь мы имеем замкнутую САУ по скорости. Уровень скорости двигателя задается величиной напряжения  $U_z$ . В регуляторе скорости значение  $U_z$  сравнивается со значением сигнала  $U_t$ , поступающего от тахогенератора и формируется закон управления. Напряжение с выхода регулятора скорости, зависящее от величины и знака разности  $U_z - U_t$ , усиливается и подается на обмотки двигателя.

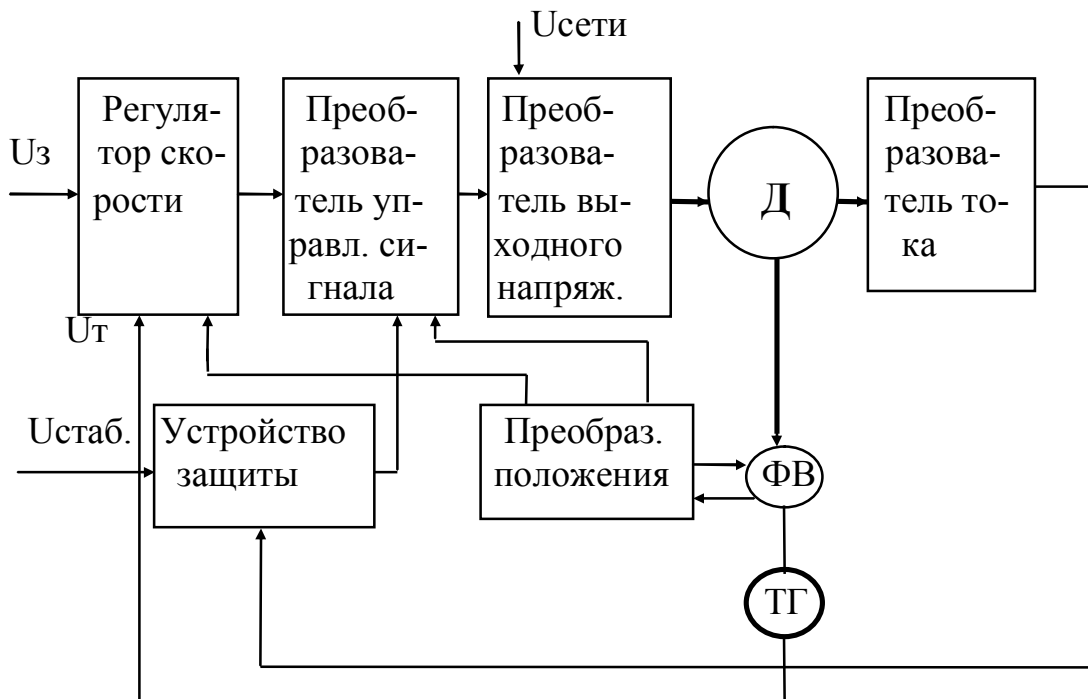


Рис. 3.10 — Функциональная схема электропривода робота РМ 104

Схема электропривода, показанная на рис. 3.10 применяется для управления степенями подвижности поворотов, руки и кисти. Схема электропривода для управления схватом приведена на рис. 3.11.

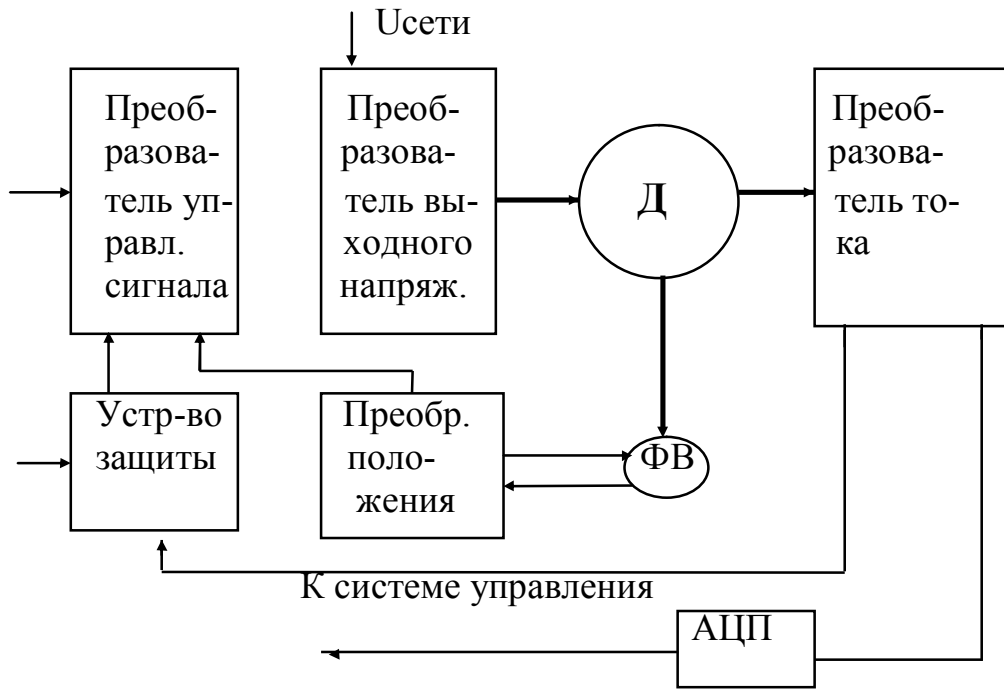


Рис. 3.11 — Схема электропривода для управления схватом

В этом приводе осуществляется нормирование моментов двигателей (усилий зажатия деталей в схвате, пропорциональных току двигателя). По достижению усилия зажатия (тока двигателя), заданного программно системой управления и анализируемого АЦП происходит отключение двигателя. В приведенных выше схемах двигатель привода Д с бесконтактным тахогенератором ТГ и датчиком положения ротора — фазовращателем ФВ располагаются на соответствующем механизме робота. Все остальные элементы привода выполнены в виде модулей и размещены в блочно-универсальном конструктиве.

### 3.3 Характеристики исполнительных устройств роботов

Наиболее важными являются энергетические и динамические характеристики роботов, а также вопросы точности и взаимодействия движений по всем степеням подвижности. К характеристикам относятся также общая масса и габаритные размеры по сравнению с полезной грузоподъемностью.

Энергетический расчет роботов связан с выбором исполнительных двигателей приводов по всем степеням подвижности манипулятора.

Мощность двигателя  $P$  определяется исходя из необходимой потребляемой мощности в каждой степени подвижности в установившемся режиме движения с максимальной скоростью для вращательного и поступательного перемещений и определяется выражениями:

$$P_{вр} = K \cdot M_{\max} \cdot \omega_{\max} \quad \text{или} \quad P = K \cdot F_{\max} \cdot V_{\max},$$

где  $K$  — коэффициент запаса, учитывающий перегрузки в динамических режимах;

$M$  — номинальный момент;

$F$  — сила;

$\omega, V$  — угловая и линейная скорости.

Динамические характеристики робота должны обеспечивать необходимую быстроту набора скорости движения и торможения при остановке, при этом остановка должна осуществляться плавно, без колебаний и с большой точностью.

Для расчета динамических качеств манипулятора составляются дифференциальные уравнения динамики движения звеньев с учетом их масс и моментов инерции. К этим уравнениям добавляются уравнения динамики самих приводных механизмов. В результате получается сложная система дифференциальных уравнений высокого порядка. Причем уравнения становятся нелинейными. Дополнительно нелинейности появляются при учете влияния сухого трения и зазоров в механических передачах.

Сложность всей системы уравнений динамики не позволяет решить задачу аналитически и поэтому прибегают к математическому моделированию динамики манипулятора на цифровых или аналоговых комплексах. Эти задачи решаются на уровне проектирования робототехнических систем и в данном курсе не рассматриваются.

### **3.4 Датчики обратных связей**

Из аналоговых датчиков углового и линейного перемещения чаще всего применяются потенциометры (рис. 3.12).



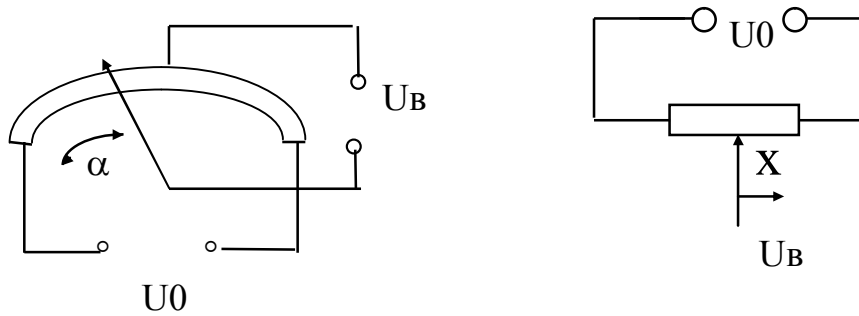


Рис. 3.12 — Датчики углового и линейного перемещения

В потенциометрических датчиках осуществляется преобразование углового  $\alpha$  или линейного  $X$  перемещений движка в напряжение  $U_v$ , пропорциональное этому перемещению.

Пропорциональность  $U_v = K\alpha$  и  $U_v = KX$  можно свести к допустимой величине выбором соотношений всех параметров датчика. В робототехнике применяются металлопленочные и полупроводниковые потенциометры, обладающие большой точностью и плавностью по сравнению с обычными проволочными.

Кроме потенциометрических датчиков для измерения углов и угловых рассогласований в следящих приводах применяются вращающиеся трансформаторы, сельсины и т.д. Для измерения линейных перемещений используются индуктосины.

Аналоговым датчиком угловой скорости для обратной связи в приводе служит тахогенератор. Он позволяет с определенной точностью измерять скорость и выдавать напряжение пропорционально угловой скорости вала.

В последнее время в следящих приводах роботов стали применяться цифровые датчики обратной связи — импульсные фотоэлектрические и кодовые. Такие датчики представляют собой диск с нанесенными делениями по периферии для импульсного датчика или двоичного кода для кодового датчика. Считывание информации происходит при повороте диска фотоэлектрическим датчиком с последующей выдачей информации в систему управления.

К другому классу датчиков относятся концевые выключатели и тензометрические, измеряющие усилие по выбранной составляющей.

## **4 СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Адаптация применительно к живому организму есть приспособление организма к изменяющимся внешним и внутренним условиям.

На практике часто встречаются объекты управления, амплитудные и частотные параметры которых изменяются в широких пределах под действием внешних условий. Например, в несколько раз может изменяться момент инерции манипулятора в сложенном положении по отношению к полностью вытянутому, вязкость рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров подводного робота, работающего на разных глубинах моря при различных давлениях и температуре.

Адаптация управляющей системы необходима также при ошибках позиционирования заготовок, износе обрабатывающего инструмента, отклонении стыка свариваемых деталей от заданной траектории движения электрода сварочного автомата, расквашивании деталей в подвесном конвейере в процессе захвата их роботом, выходе из строя одной из компонент ГПС и других факторах.

В зависимости от цели управления адаптивные системы в робототехнике можно разделить на три уровня (рис. 4.1).

Первый уровень (рис. 4.1, *а*) характеризуется способностью самонастройки параметров регулятора на основе информации о состоянии объекта, находящегося под возмущающим воздействием внешней среды.

Примером этого уровня может служить регулятор, управляющий замкнутым по положению электрогидравлическим приводом манипулятора подводного аппарата.

Для второго уровня (рис. 4.1, *б*) характерно включение в состав управляющего устройства дополнительных информационных средств, обеспечивающих сбор и обработку данных о состоянии внешней среды. На основании анализа изменений внешней среды осуществляется коррекция управляющей программы робота, позволяющая в новых условиях достичь поставленной цели. На уровне адаптации коррекция программных действий происходит в небольших пределах, а эффект от применения таких адаптивных систем управления на практике значителен. Например, в технологическом процессе электродуговой роботизированной сварки крупногабаритных изделий трудно обеспечить постоянство пространственного положения линии стыка свариваемых частей от изделия к изделию. Поэтому здесь требуется корректировка программной траектории движения электрода в соответствии с реальным положением стыка, измеряемым специальным датчиком.

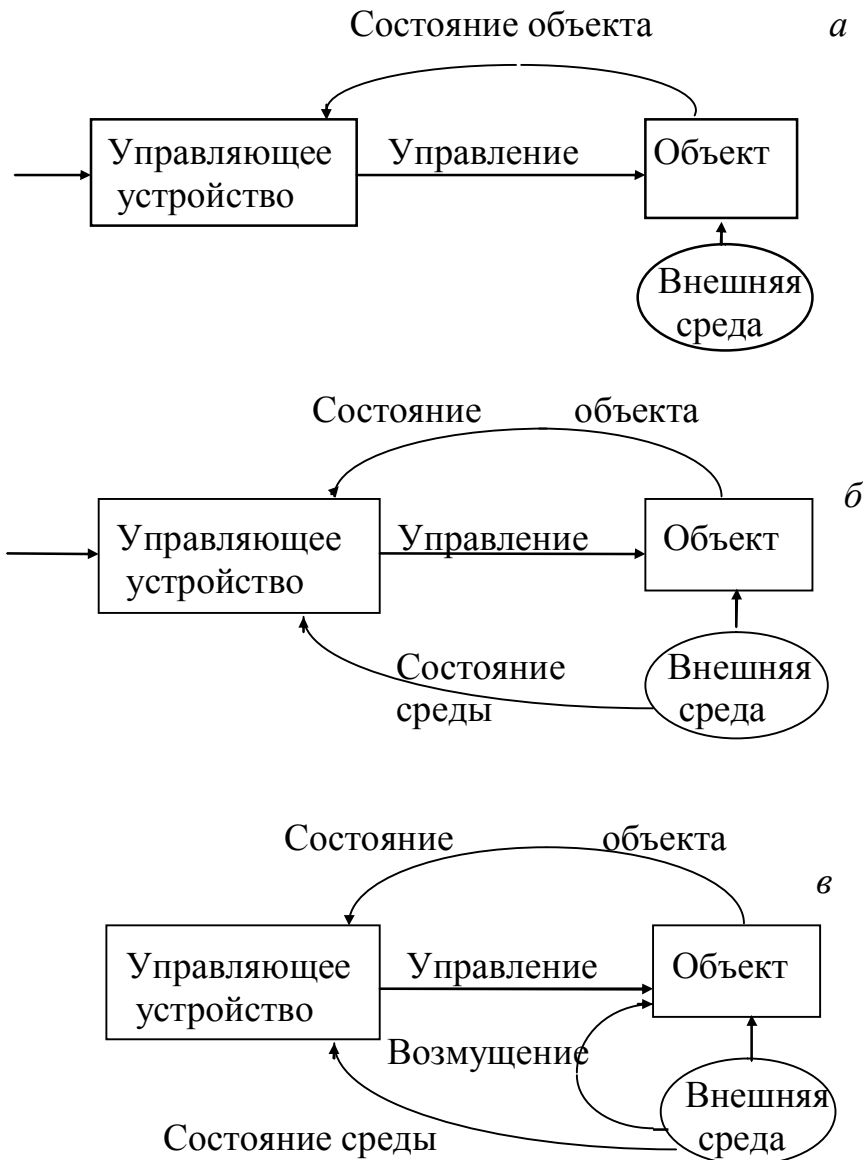


Рис. 4.1 — Уровни адаптивных систем

Для третьего уровня адаптации (рис. 4.1, в) характерны развитые средства для сбора информации о внешней среде, самодиагностирования, а возможно и саморемонта компонент управляемой производственной системы. Для систем третьего уровня характерна реализация максимальной производительности при отсутствии брака.

Рассмотрим пример взятия пластины манипулятором адаптивного робота с движущегося конвейера подвешенных пластин и штабелировки их в таре. Если момент прохождения пластины заданного положения известен, то все процедуры могут быть сде-

ланы по жесткой программе. Последовательность взятия пластины может быть представлена в следующем виде:

- задать координаты точек позиционирования;
- перенести захватное устройство в положение захвата детали;
- перейти в положение захвата детали;
- включить пневматическое захватное устройство;
- перейти в исходное положение;
- перенести захватное устройство с деталью к таре;
- выключить пневматическое захватное устройство;
- повторить;

Работу адаптивного робота можно рассмотреть с помощью алгоритма, приведенного на рис. 3.2.

В приведенном алгоритме отсутствует много мелких, но важных моментов. Для того чтобы показать их более наглядно необходимо представить показанный выше алгоритм в виде дерева вызова процедур [ 4 ].

#### **4.1 Структура адаптивной системы управления**

При рассмотрении программной и адаптивной систем управления роботом можно заметить, что они отличаются только устройствами, воспринимающими информацию о внешней среде (рис. 4.3).

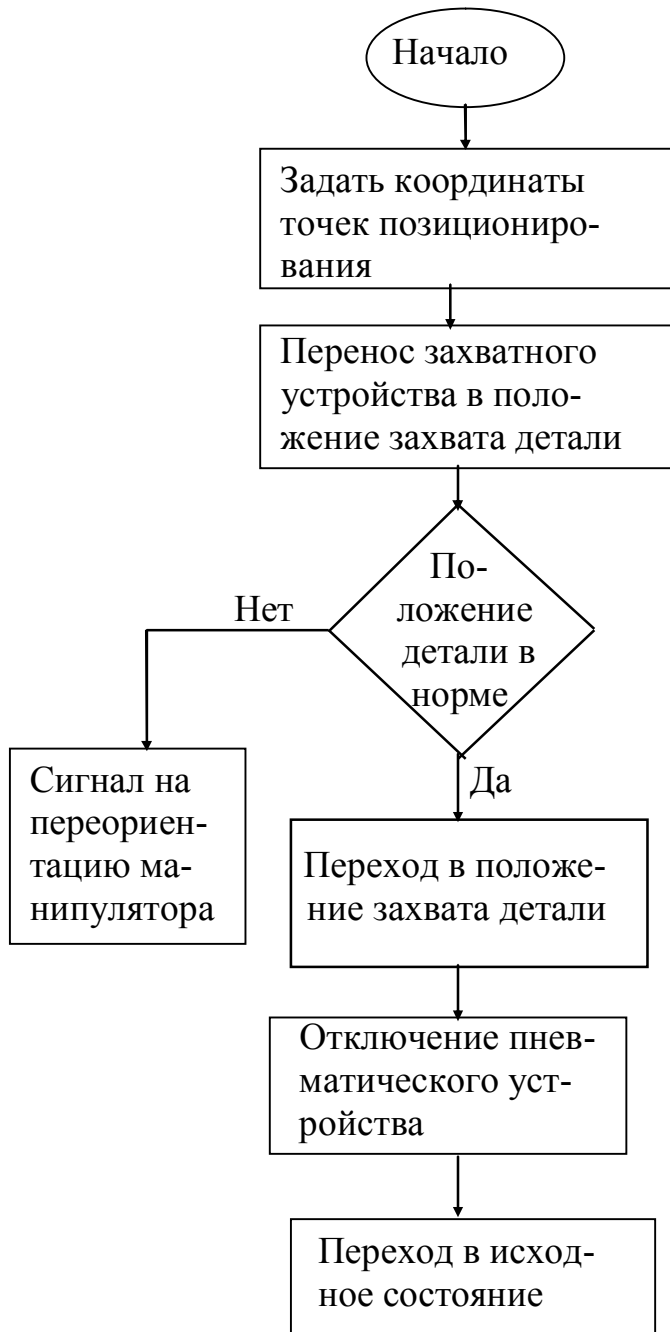


Рис. 4.2 — Алгоритм работы адаптивного робота

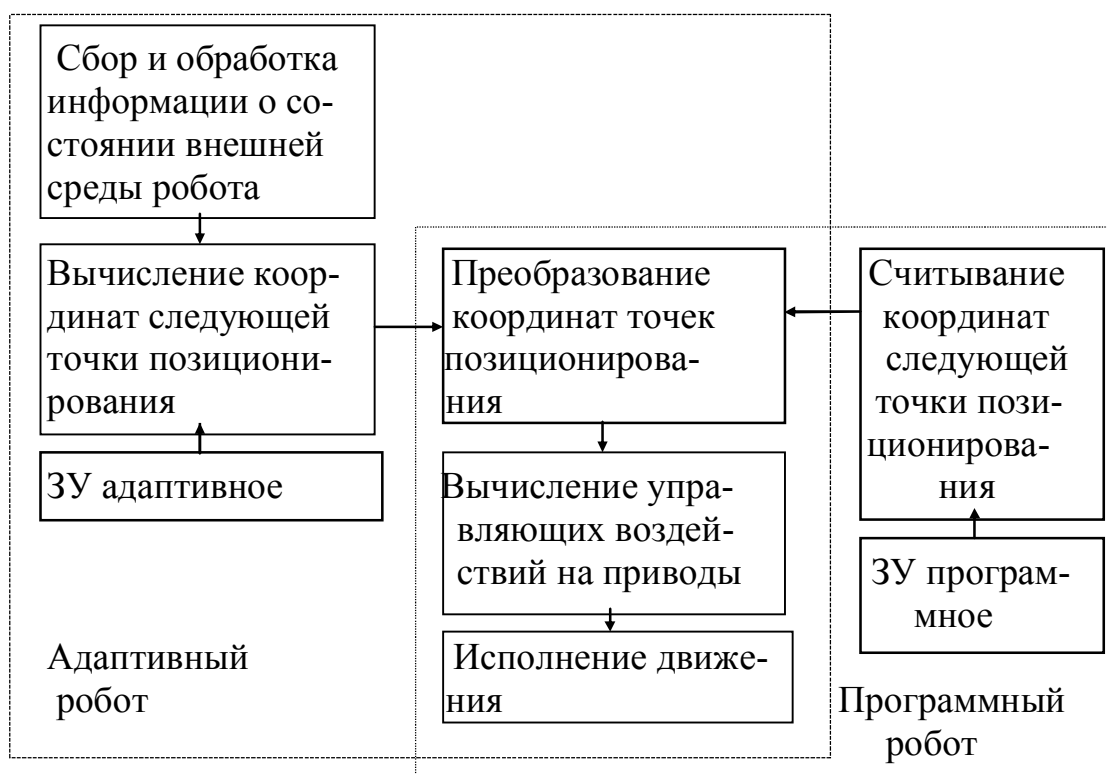


Рис. 4.3 — Структура адаптивной системы управления

Таким образом, в адаптивном роботе дополнительно присутствует информационная система и устройство для вычисления координат следующей точки позиционирования. Используется также информация об изменениях внешней среды и информация об изменениях компонент робота. Управление адаптивным роботом осуществляет вычислительное устройство, сложность которого определяется уровнем адаптации робота. Для сложных адаптивных робототехнических систем вычислительное устройство представляется мультимикропроцессорной сетью.

## 4.2 Программное обеспечение адаптивных роботов

Программное обеспечение адаптивных роботов обеспечивает обслуживание внешних устройств, которыми по отношению к системе управления являются человек-оператор, приводы робота, информационная система, технологическое оборудование и ЭВМ верхнего уровня. Структура программного обеспечения адаптивного робота показана на рис. 4.4.

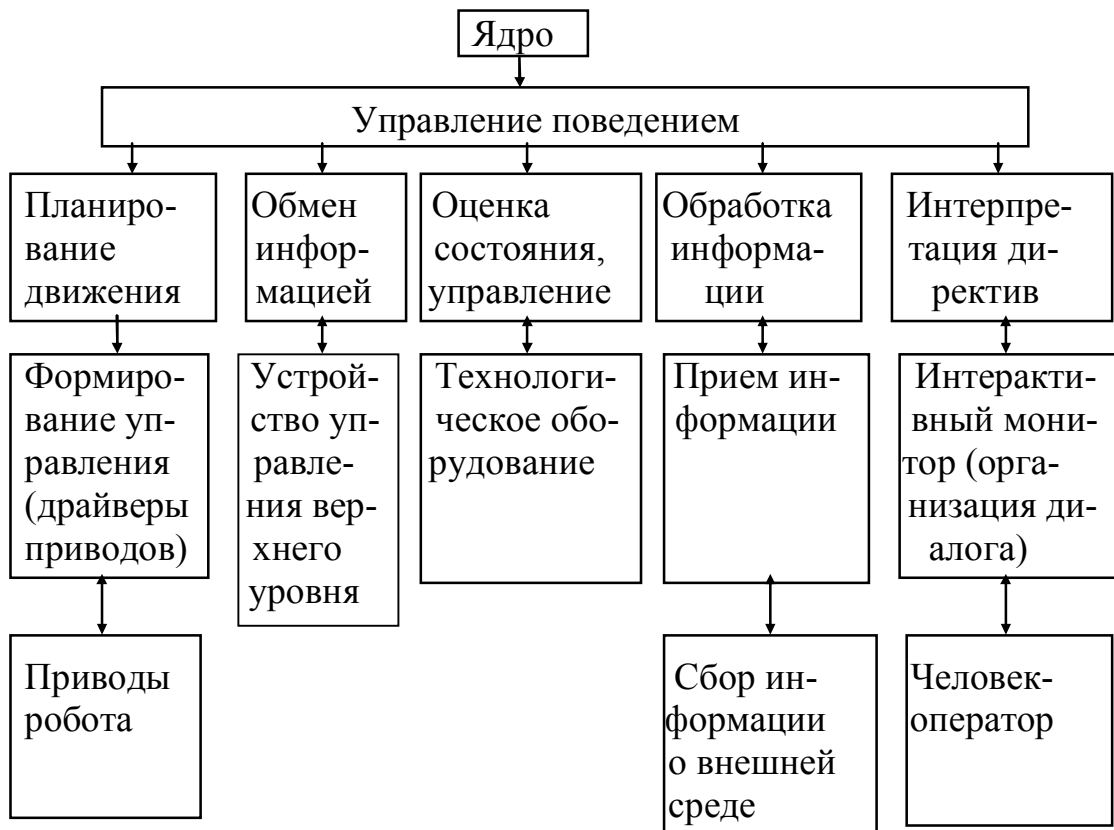


Рис. 4.4 — Структура ПО адаптивного робота

В режиме активного диалога человека-оператора с системой управления человек осуществляет следующие действия:

- формирует и редактирует рабочую программу;
- создает объектный и загрузочный модули рабочей программы, следит за состоянием файлов и программ в библиотеке;
- отлаживает рабочую программу;
- обеспечивает контроль исправности оборудования включая каналы связи с технологическим оборудованием, а также калибрует измерительные системы робота. Помимо организации диалога в управлении поведением программное обеспечение осуществляет интерпретацию директив:
  - пооператорное выполнение исходной программы (директивы);
  - выявление и реализация смысла программы или какой либо ее части;
  - перевод с одного языка в другой.



Функции программного обеспечения по отношению к исполнительному устройству-манипулятору выглядят следующим образом:

- подробный анализ задания;
- разбиение задания на подзадачи и элементарные действия;
- планирование движения инструмента или захватного устройства для реализации этих действий;
- определение последовательности точек позиционирования;
- преобразование координат точек позиционирования инструмента в требуемое положение сочленений манипулятора и формирование команд управления приводами;
- поддержка программным обеспечением работа информационного обмена с верхним по отношению к нему уровнем управления;
- решение общесистемных задач по обработке сигналов прерываний по управлению вводом-выводом информации и распределению вычислительных ресурсов.

Необходимо отметить, что функции программного обеспечения адаптивного робота сходны с функциями операционных систем реального времени. Это позволяет при проектировании систем управления роботов использовать опыт, накопленный в области теории универсальных операционных систем.

### **4.3 Системы очувствления роботов**

Адаптивные роботы по сравнению с программными обладают большей эффективностью и оснащаются информационными системами для сбора данных о внешней среде и оценки состояния компонент устройств управления и манипулятора.

Информационные системы адаптивных роботов можно разделить по функциональному назначению на две группы: [2]

Системы очувствления контактного типа:

- силомоментные;
- тактильные.

Системы бесконтактного типа:

- технического зрения;
- локационные.

Для оценки состояния манипулятора существуют датчики положения, скорости и крутящего момента.

### **4.3.1 Силомоментные системы очувствления**

Силомоментные системы очувствления — это сенсорные устройства, обеспечивающие измерение компонент вектора силы и вектора момента сил, развиваемых роботом в процессе взаимодействия с изделием в проекции на некоторую систему координат. Такие системы построены на базе тензопреобразователей. Тензопреобразователь или тензорезистор представляет собой закрепленный на бумажной основе проволочный резистор, изготовленный из провода с высоким удельным сопротивлением. Тензорезистор приклеивается на исследуемую поверхность и при ее деформации сопротивление резистора изменяется. На выходе тензопреобразователя появляется сигнал, поступающий в дальнейшем в измерительный тракт. В качестве вычислительного устройства используется либо микропроцессор, либо микро ЭВМ. Структурная схема системы силомоментного очувствления приведена на рис. 4.5.

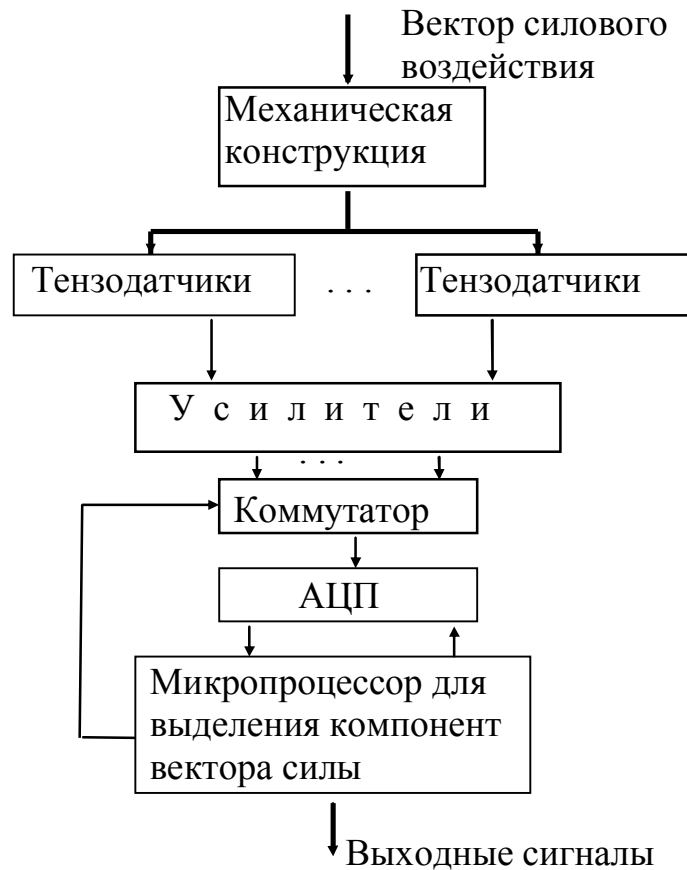


Рис. 4.5 — Схема системы силомоментного очувствления

Система состоит из механической конструкции с размещенными на ней тензопреобразователями, формирующими сигнал, пропорциональный деформации конструкции, согласующих усилителей, коммутатора, позволяющего выбирать нужный преобразователь и устройства для вычисления вектора момента сил. Аналоговый сигнал с выхода силомоментной системы сопрягается с микропроцессором посредством аналого-цифрового преобразователя. Датчики системы силомоментного очувствления устанавливаются между последним звеном робота и схватом.

### 4.3.2 Тактильные системы очувствления

Тактильными системами очувствления называют такие, которые фиксируют факт касания роботом объекта, определяют положение точек касания и измеряют контактные силы в этих точках.

Прообразом тактильных систем очувствления послужило чувство осязания, которым наделен человек. Он получает ин-

формацию о форме и текстуре поверхности предметов путем ощупывания последних кончиками пальцев, кожа которых имеет чувствительные датчики. В основу построения таких систем заложены пьезоэлектрический, электромагнитный, магнитоэлектрический и другие эффекты. Тактильные датчики обычно помещают на внутренние и внешние поверхности схвата. Рассмотрим пример, когда в основу работы тактильного датчика заложен эффект изменения под нагрузкой электрического сопротивления эластичного материала, по всей массе которого в процессе изготовления распределены электропроводящие микрочастицы (рис. 4.6).

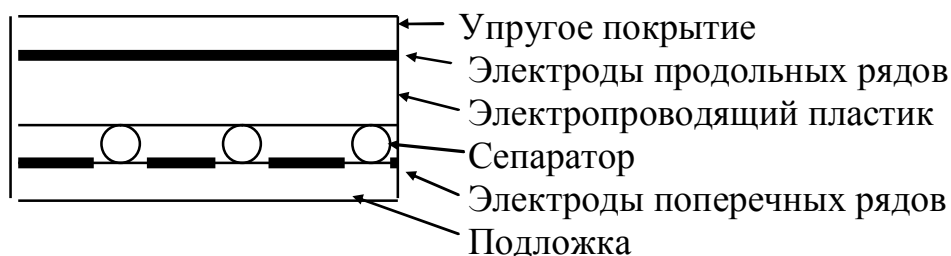


Рис. 4.6 — Устройство тактильного датчика

### 4.3.3 Локационные системы очувствления

Локационные системы очувствления это сенсорные устройства, которые используя принципы активной и пассивной локации могут обнаруживать подвижные и неподвижные объекты, определять их местоположение, осуществлять наведение и захват объектов.

При пассивной локации датчики системы улавливают излучение искомого объекта, а при активном режиме измерения локационная система кроме приемников излучения имеет еще и источник сигналов, которые посылаются в направлении предполагаемого местонахождения объекта. Отраженные волны регистрируются приемником.

Принцип действия локационной системы очувствления рассмотрим на примере ультразвуковой локационной системы (рис. 4.7). Система работает следующим образом.

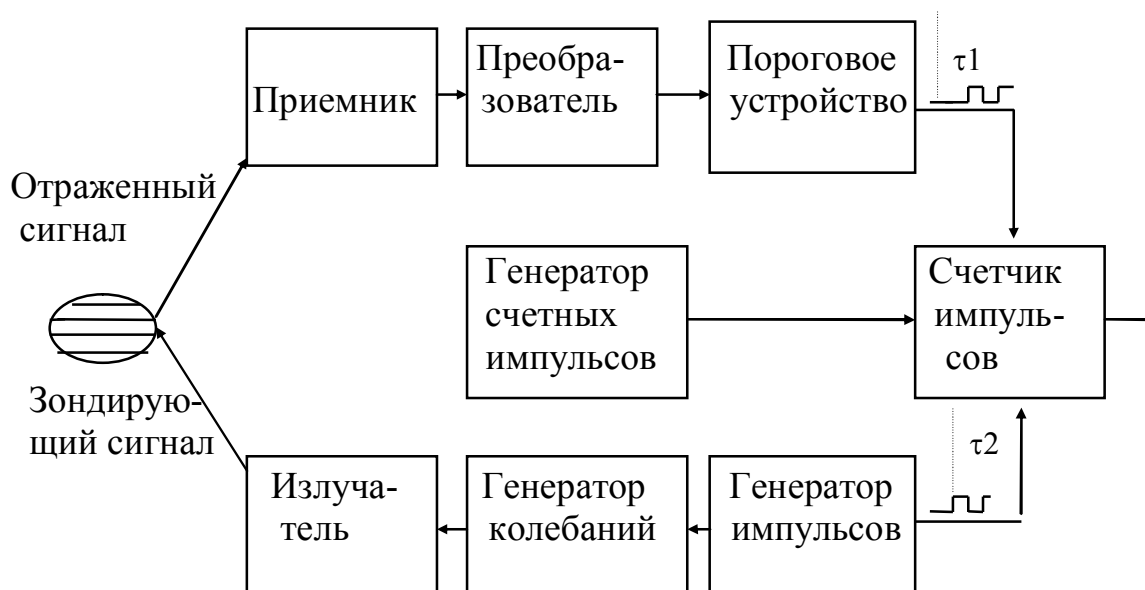


Рис. 4.7 — Структура ультразвуковой локационной системы

Синусоидальные колебания, вырабатываемые генератором колебаний модулируются прямоугольными импульсами, поступающими с генератора импульсов. Одновременно прямоугольные импульсы подаются на счетчик импульсов и запускают его. Счетчик начинает считать импульсы, поступающие с генератора счетных импульсов. Отраженный сигнал с объекта принимается приемником, усиливается и детектируется преобразователем. На выходе порогового устройства формируются прямоугольные импульсы с частотой равной частоте импульсов, поступающих на запускающий вход счетчика.

Таким образом на вход, останавливающий работу счетчика, подаются прямоугольные импульсы, задержанные относительно запускающих импульсов на время равно  $\tau = (\tau_1 - \tau_2)$ .

На выходе счетчика импульсов формируется код расстояния, которое будет пропорционально удвоенному расстоянию до объекта. Это условие будет выполняться, если излучатель и приемник находятся в непосредственной близости друг от друга.

Локационные системы, как правило, устанавливают на захватном устройстве робота. Они имеют совмещенный излучатель-приемник, что позволяет уменьшить размеры и разместить его между губками схвата.

## 5 СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Адаптивный промышленный робот получает от системы технического зрения (СТЗ) до 90 % информации о состоянии внешней среды.

СТЗ — это такие сенсорные устройства, которые позволяют получать изображение рабочей сцены, ее преобразование, анализ, обработку с помощью микро ЭВМ или микропроцессора и выдачу результатов измерения исполнительному устройству робота, а также ЭВМ вышестоящего уровня [6].

Существует два метода установки СТЗ в адаптивных робототехнических комплексах. На рис. 5.1 показаны методы включения СТЗ в систему — независимая и установка видеосенсора на руке манипулятора.

Преимущества использования первого метода заключаются в неизменности геометрических соотношений, связывающих сис-

темы координат видеокамеры и робота, а также в распараллеливании работы СТЗ и устройства управления движением. К недостатку нужно отнести то, что определенные движения манипулятора могут мешать осмотру сцены.

Преимущества второго метода состоят в том, что при любых движениях манипулятор не закрывает рабочей сцены камеры. Можно также измерять относительные и абсолютные расстояния от рабочего органа до объекта. К недостатку необходимо отнести сложность процедуры согласования координат робота, рабочего пространства и СТЗ.

Функции СТЗ сводятся в основном к выполнению следующих процедур: получение изображения рабочей сцены, преобразование видеосигнала в цифровую форму, формирование контурного изображения объектов, фильтрация помех, сегментация изображения, выделение признаков и описание объекта, распознавание или классификация объектов и выдача сообщений о результатах измерений.

В качестве датчиков изображения в СТЗ применяются оптоэлектронные преобразователи — вакуумные передающие трубки типа видикон и полупроводниковые матрицы приборов с зарядовой связью. Наиболее перспективными датчиками являются полупроводниковые матрицы, представляющие собой кремниевую пластину  $8 \times 8$  мм, на которой методом интегральной технологии выращены элементы, способные воспринимать проецируемое на них изображение.

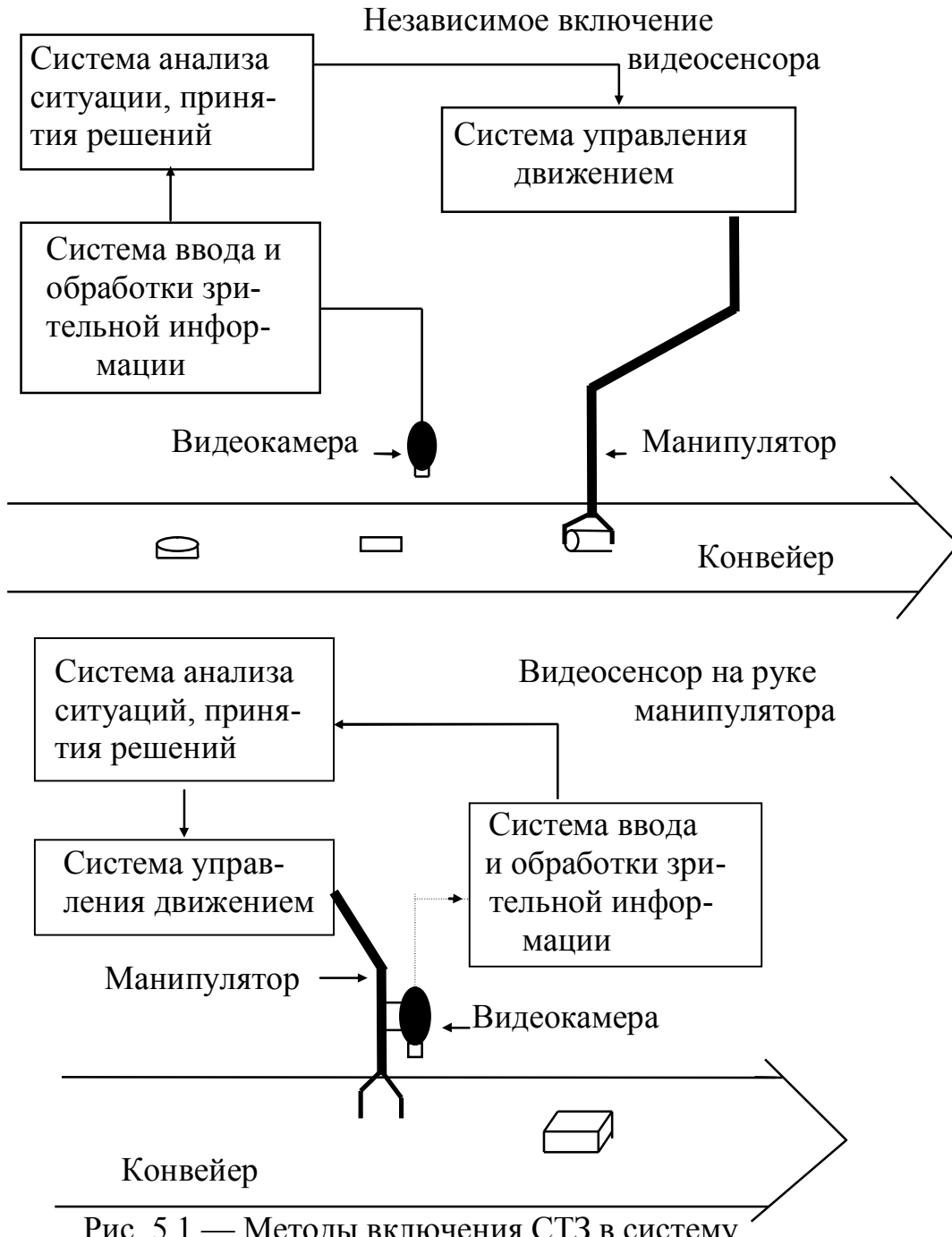


Рис. 5.1 — Методы включения СТЗ в систему

Пример структурной схемы СТЗ с применением оптоэлектронных преобразователей приведен на рис. 5.2.



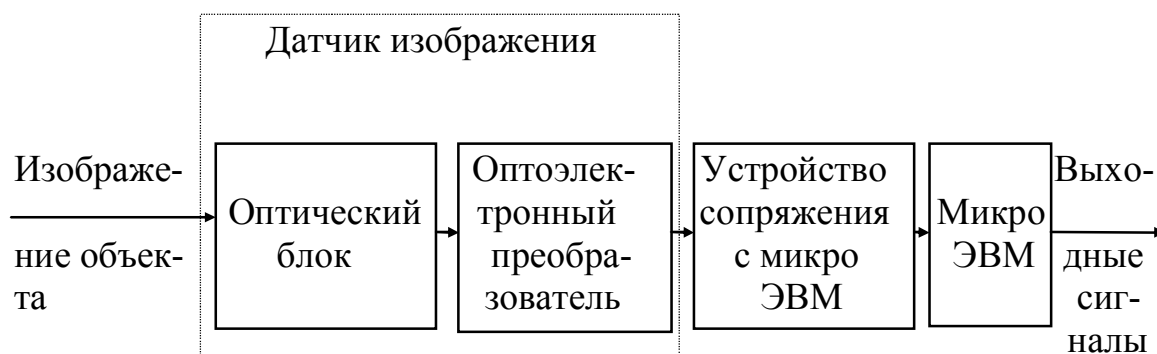


Рис. 5.2 — Структурная схема СТЗ с оптоэлектронными преобразователями

Важным достоинством схемы является возможность работы такой СТЗ в реальном времени, что так необходимо при эксплуатации промышленных роботов.

Стандартный видеосигнал сформированный датчиком изображения фильтруется и преобразуется в цифровую форму с помощью устройства сопряжения. При этом поле зрения преобразователь разбивает на  $256 \times 256$  элементов изображения.

Если СТЗ имеет возможность различать уровни яркости, квантоваться может амплитуда видеосигнала в каждой точке изображения.

На практике часто оперируют с двухградационными или бинарными изображениями. В этом случае для выделения объектов, например, светлого на черном фоне задается «эталонный» серый цвет. При работе системы более темные элементы изображения относятся к фону, светлые считаются объектами. Таким образом деление исходного изображения на черные и белые элементы значительно снижает качество обработки изображения при минимальном объеме памяти для заполнения объекта.

Одним из основных этапов преобразования и анализа изображения является этап обработки изображения на ЭВМ, входящей в состав СТЗ. При этом распределение яркости изображения представляется массивом нулей и единиц. Если выделить точки с резким изменением яркости, то получим контур детали, находящейся в поле зрения датчика или точку, например отверстие в детали. После анализа принадлежности точек тому или иному контуру выполняется сегментация изображения — процедура

выделения на изображении отдельных не соприкасающихся объектов.

Завершающей фазой распознавания является выделение признаков каждого сегментированного объекта. К параметрам признаков можно отнести площадь, длину периметра, момент инерции, радиусы вписанной и описанной окружности. Эти параметры не должны изменяться при их смещении или повороте. Идентификация нужного объекта выполняется путем сравнения вычисленных признаков со списком параметров, полученным в процессе обучения СТЗ. Результаты, полученные в процессе обучения, хранятся в памяти микро ЭВМ.

Таким образом, СТЗ является перепрограммируемым обучаемым автоматом, который решает задачи распознавания и идентификации объектов.

Аппаратные средства СТЗ включают в себя помимо устройств, входящих в рабочий комплекс, графический дисплей, видеоконтрольное устройство, накопитель на гибких магнитных дисках, печатающее устройство и отладочный комплекс с программатором. Такой комплекс позволяет быстро перепрограммировать рабочие комплексы, находящиеся от отладочного комплекса на значительном расстоянии.

Скорость перепрограммирования СТЗ для обработки изображений другого класса объектов определяется уровнем ее программного обеспечения, которое имеет модульную структуру и организовано в виде проблемно-ориентированной операционной системы. Ядро системы обеспечивает взаимодействие между программными модулями с использованием библиотеки подпрограмм (рис. 5.3).

**Интерпретатор команд** предназначен для преобразования команд оператора в формат команд системного ядра.

**Справочник оператора** по требованию программиста позволяет разъяснить возможности операционной системы, а также выдавать сообщения при неверном введении команды.

**Программные модули связи** обеспечивают сеть программы для обмена информацией между технологическим оборудованием и рабочим комплексом СТЗ.

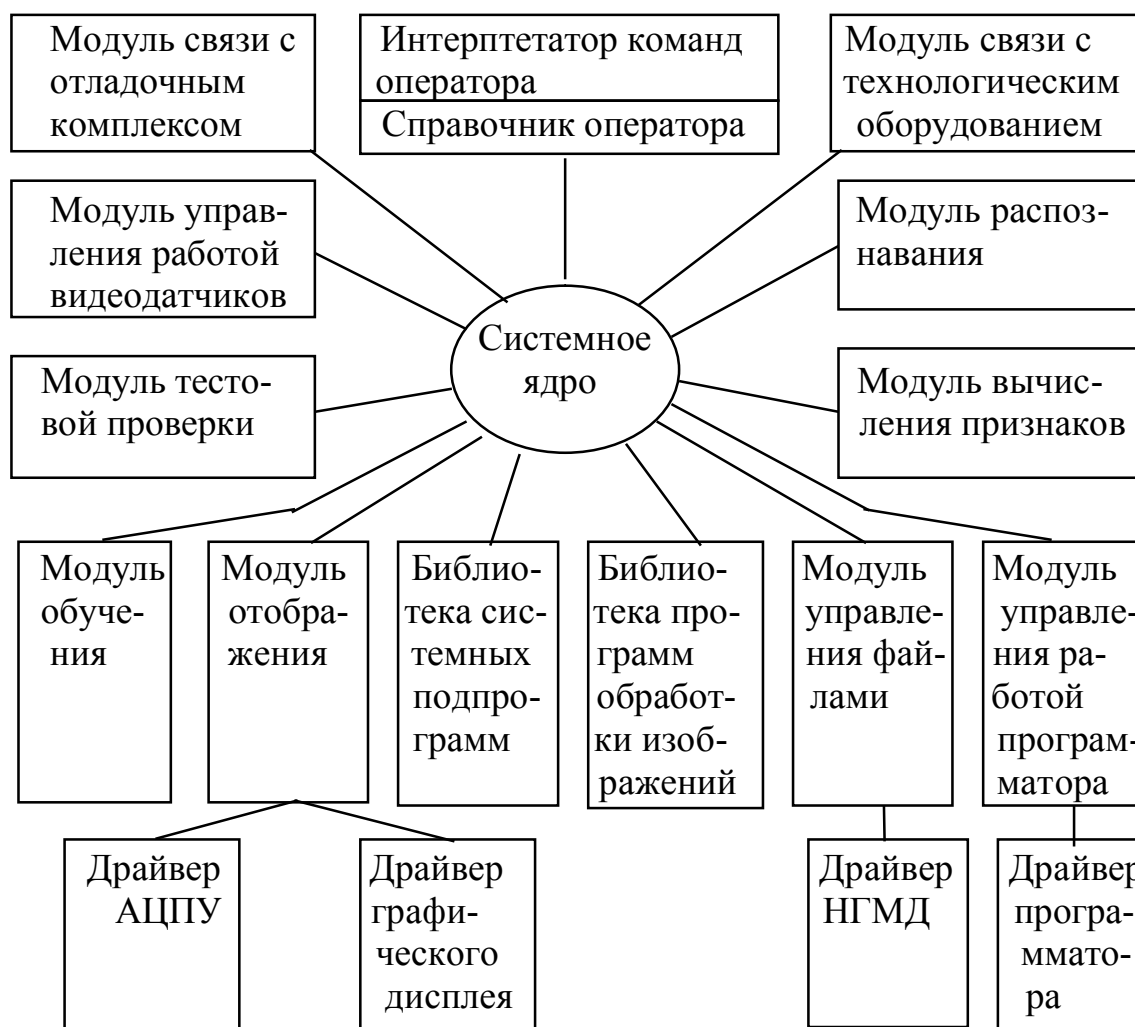


Рис. 5.3 — Программное обеспечение СТЗ

**Модуль управления работой видеодатчика** связывает телекамеру с системой, выдает команды для выбора режима работы манипулятора и выполняет предварительное преобразование изображения: фильтрацию, определение контура и анализ связности.

**Модуль тестовой проверки** осуществляет оперативный контроль аппаратных и программных средств СТЗ.

**Модуль вычисления признаков** служит для описания отдельных деталей, выделенных при сегментации изображения и проводит их к стандартному списку параметров.

**Модуль распознавания** обеспечивает сравнение полученного списка параметров со списком, хранящимся в памяти микро ЭВМ.

**Модуль обучения** обеспечивает подготовку СТЗ к работе с другими объектами.

Программное обеспечение имеет также ряд вспомогательных модулей, обеспечивающих работу оператора. К числу их относится модуль управления файлами для обеспечения записи программ на магнитных дисках, модуль отображения для формирования массива данных, выводимых на графический дисплей или печать и модуль управления работой программатора для формирования и записи программ обработки изображений в ПЗУ.

## 6 ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

При создании комплексно-автоматизированных производств применяются средства робототехники, которые совместно с другим технологическим оборудованием составляют гибкие автоматизированные производства (ГАП). Такие производства переходят на выпуск новой продукции в основном путем смены управляющих программ. Промышленные роботы являются главным компонентом гибких автоматизированных производств.

Основным элементом гибкого автоматизированного производства является гибкая производственная система (ГПС). Гибкая производственная система в автоматизированном производстве осуществляет технологический процесс изготовления изделий (рис. 6.1).



Рис. 6.1 — Состав гибкой производственной системы

На рис. 6.2 приведен типовой состав гибкого автоматизированного производства. Автоматизированные рабочие места, приведенные на рисунке реализуют автоматизированные системы научных исследований и проектирования (АСНИ и САПР), а также технологическую подготовку производства (АСТПП).

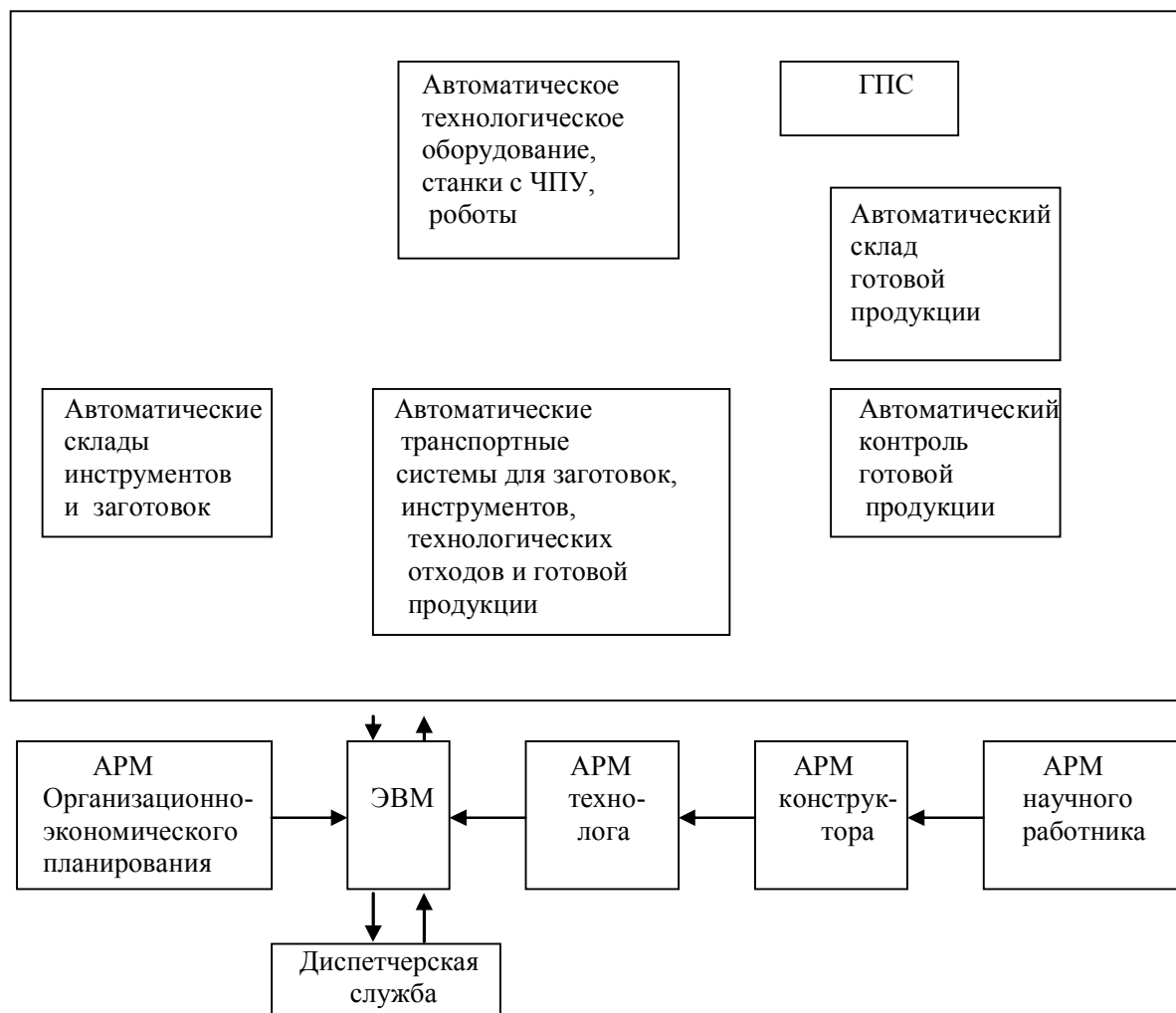


Рис. 6.2 — Состав гибкого автоматизированного производства

## 6.1 Основные сведения о гибких производственных системах

**Гибкая производственная система** — это несколько единиц технологического оборудования, снабженных средствами и системами, которые обеспечивают функционирование оборудования в автоматическом режиме.

По организационной структуре ГПС подразделяются на следующие уровни:

- гибкий производственный модуль (ГПМ);
- гибкая автоматизированная линия (ГАЛ);
- гибкий автоматизированный участок (ГАУ);
- гибкий автоматизированный цех (ГАЦ);
- гибкий автоматизированный завод (ГАЗ).

По уровню автоматизации ГПС подразделяются на ступени:

- гибкий производственный комплекс (ГПК);
- гибкое автоматизированное производство (ГАП).

Под ГПМ понимается единица технологического оборудования, оснащенная системой ЧПУ или другим устройством программного управления и работающая как самостоятельно, так и в составе ГПС [1]. При этом функции, связанные с изготовлением изделия, должны осуществляться автоматически.

Средства автоматизации ГПМ включают в себя накопители программных средств (ПС), устройства загрузки выгрузки деталей, устройство замены технологической оснастки, устройство удаления отходов (стружки, охлаждающей жидкости), устройство автоматизированного контроля (диагностирование), устройство переналадки.

Частным случаем ГПМ является роботизированный технологический комплекс (РТК), если его можно встроить в систему более высокого уровня.

ГАЛ состоит из ГПМ, РТК или другого технологического оборудования, объединенного в автоматизированную систему управления.

ГАУ — это ГПС, состоящая из ГПМ, РТК или другого технологического оборудования, объединенного в автоматизированную систему, в которой в отличие от ГАЛ предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования.

ГАЦ представляет собой совокупность ГАЛ и (или) ГАУ, предназначенных для изготовления изделий заданной номенклатуры.

**ГАЗ** это система, состоящая из ГАЦ и обеспечивающая выпуск готовых изделий в соответствии с планом основного производства.

### 6.1.1 Этапы прохождения разработки

Современное производственное предприятие работает по всем этапам жизненного цикла изделия (ЖЦИ) и комплексная автоматизация также должна охватывать все этапы ЖЦИ (рис. 6.3) и в том числе все этапы производственного цикла изделия (ПЦИ) [2].

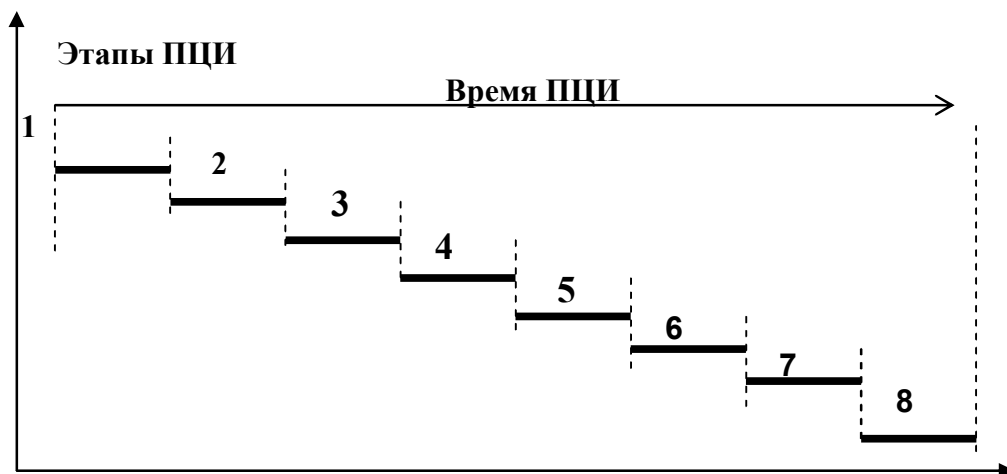


Рис. 6.3 — Время ПЦИ при последовательной реализации этапов: 1 — маркетинг; 2 — проектирование изделий; 3 — проектирование технологии; 4 — материально-технологические процессы; 5 — производство; 6 — контроль и испытание; 7 — хранение; 8 — сбыт

Одной из главных задач внедрения гибких производственных систем при комплексной автоматизации является уменьшение длительности производственного цикла изделия. Одним из путей уменьшения производственного цикла является переход от фазового последовательного метода выполнения этапов к параллельному (concurrent engineering) (рис. 6.4).





Рис. 6.4 — Совмещенное проектирование

Параллельное выполнение этапов предполагает совмещение выполнения этапов ПЦИ, при этом участники проектирования могут решать функциональные задачи каждого этапа.

При фазовом методе этапы производственного цикла изделия выполняются последовательно, а полное время изготовления заказа определяется суммой времен выполнения каждого этапа. В действительности время выполнения изделия будет больше за счет итерационного процесса принятия решения по взаимосвязанным этапам.

На рис. 6.5 показан двух итерационный процесс принятия конструкторско-технологических решений.



Рис. 6.5 — Конструкторско-технологическое проектирование при последовательной реализации этапов:

1, 2 – итерации; к – конструкторское проектирование;  
т – технологическое проектирование

Время выполнения заказа увеличивается не только за счет итерационного процесса, но и за счет трудоемкости подготовительных работ. При этом время самого производства составляет 5—10 % от всего времени выполнения заказов. Таким образом, резерв сокращения времени производственного цикла изделий заложен в сфере подготовки производства.

### 6.1.2 Место промышленных роботов в ГПС

В гибкую производственную систему может входить любая производственная единица, состоящая из технологического объекта управления (ТОУ) и многоуровневой технологической системы управления (рис. 6.6).

Система управления обеспечивает задание параметров ГПС и ее адаптацию к изменению производственных заданий и ситуаций в экономически обоснованных пределах.

Особенность ГПС состоит в гибко перестраиваемой технологии обработки изделий при высокой степени автоматизации и минимальном участии человека в выполнении прямых производственных функций, связанных с процессом обработки изделий.

**В состав ТОУ ГПС** может входить следующее оборудование:

**гибкий производственный модуль** — производственная единица, состоящая из одного или нескольких элементов технологического оборудования с системой числового программного управления. Система ЧПУ предназначена для управления технологическим оборудованием и обеспечения взаимосвязи с другими элементами ГПС. Гибкий технологический модуль оснащается роботизированными устройствами подачи и удаления обработанных деталей и инструментов, датчиками измерения и контроля в процессе обработки, системой диагностики отказов и восстановления работоспособности модуля, устройством сбора и удаления отходов производства;

**автоматизированный складской модуль** — оборудование с локальной системой управления (ЛСУ), построенной на базе микропроцессорной техники, способное функционировать автономно или по командам от управляющей ЭВМ. ЛСУ предназ-

цена для обеспечения взаимосвязи с другими элементами ГПС  
и



Рис. 6.6 — Структура ГПС

управления операциями по загрузке, размещению и выдаче со склада заготовок, готовых изделий, приспособлений, инструментов и т.д.

**вспомогательный модуль** — совокупность оборудования, предназначенного для обеспечения технологических операций в гибких технологических модулях;

**гибкий контрольно — измерительный модуль** — совокупность программно — переналаживаемого оборудования, предназначенного для контроля качества выполнения операций в гибких технологических модулях и корректировки параметров технологического процесса или программы работы ГПС по результатам контроля;

**автоматизированный транспортный модуль** — единица производственного оборудования с ЛСУ, выполненная на базе микропроцессорной техники, способная функционировать автономно или по командам от управляющей ЭВМ, ЛСУ и предназначенная для обеспечения взаимосвязи с другими элементами ГПС и управления операциями по транспортировке заготовок, готовых изделий и т.д.

Многоуровневая технологическая система управления содержит ряд подсистем.

Уровень управления технологическим процессом производства взаимодействует с уровнем локального управления технологическим оборудованием, в состав которого входят промышленные роботы, системы ЧПУ гибких технологических модулей, системы управления автоматизированными складскими и транспортными модулями, локальные системы управления контрольно-измерительных модулей, терминальные модули вспомогательных модулей.

Уровень оперативно-календарного планирования, учета и управления подготовкой производства взаимодействует с уровнем управления предприятием (СУП).

Уровень управления технологическим процессом производства СУ ГПС включает подсистемы сбора информации о параметрах технологического процесса и диагностики состояния автоматизированного технологического комплекса, подсистемы вычисления параметров технологического процесса и обобщенных показателей ТОУ, отображения и регистрации текущих значений параметров технологического процесса, формирования и

выдачи управляющих воздействий, координации работы модулей технологического оборудования и подсистемы распределения управляющих программ по системам ЧПУ.

На уровне оперативно-календарного планирования, учета и управления подготовкой производства СУ ГПС содержит подсистемы сменно-суточного планирования пооперационной обработки изделий, учета выполнения планов подготовки производства в ГПС, суточного планирования запуска партий изделий в обработку на декаду, расчета планов подготовки производства в ГПС, формирования и ведения библиотеки управляющих программ и подсистемы информационного обеспечения процесса функционирования СУ ГПС.

На уровне управления технологическим процессом производства подсистемами реализуются следующие функции.

Подсистемы «Сбор информации о параметрах технологического процесса» и «Диагностика состояния автоматизированного технологического комплекса», выполняют диагностику состояния каналов связи УВК — системы ЧПУ и УВК — ЛСУ, сбор информации о состоянии оборудования в технологических модулях, о качестве обработки изделий по операциям, информации о количестве обработанных изделий по операциям.

Подсистема «Отображение и регистрация текущих значений параметров технологического процесса» осуществляет построение и обновление динамических моделей процесса производства, автоматизированного склада, автоматизированного транспорта, а также отображение информации о состоянии технологического оборудования.

Подсистема «Вычисление параметров технологического процесса и обобщенных показателей ТОУ» позволяет вести учет выполнения сменно-суточных заданий по обработке изделий, учет простоев оборудования в технологических модулях и числа забракованных деталей, а также производить расчет технико-экономических показателей ГПС.

Подсистема «Формирование и выдача управляющих воздействий» формирует и корректирует очереди заявок на обслу-

живание гибких технологических модулей, транспортных и складских модулей.

Подсистема «Координация работы модулей технологического оборудования» обеспечивает связь с модулями ГПС, реализует функции диспетчерования подсистем СУ ГПС.

Подсистема «Распределение управляющих программ по системам ЧПУ оборудования» осуществляет управление распределением управляющих программ по системам управления технологического оборудования, передает управляющие программы по каналам связи из библиотеки управляющих программ в системы ЧПУ или ЛСУ, выдает результаты диагностики при вводе (выводе) управляющей программы.

На уровне оперативно-календарного планирования, учета и управления подготовкой производства подсистемы СУ ГПС выполняют следующие функции.

Подсистема «Сменно-суточное планирование пооперационной обработки изделий» проводит расчет сменно-суточных заданий технологическим модулям по обработке изделий, корректировку сменно-суточных заданий технологических модулей по обработке изделий.

Подсистема «Учет выполнения планов подготовки производства в ГПС» осуществляет учет выполнения планов подачи на склад заготовок, приспособлений, инструментов на сутки, учет наличия управляющих программ.

Подсистема «Суточное планирование запуска партий изделий в обработку на декаду» производит формирование очередности запуска партий изделий в обработку для заданного периода управления, расчет плана-графика запуска партий изделий в обработку на интервал внутри выбранного периода управления, расчет планов подготовки производства на сутки, корректировку плана-графика запуска изделий в обработку на сутки.

Подсистема «Формирование и ведение библиотеки управляющих программ» выполняет управление библиотекой управляющих программ, ввод или вывод управляющих программ с программноносителя, редактирование текстов управляющих про-

грамм, выдачу справок о составе библиотеки управляющих программ, удаление управляющих программ.

Подсистема «Информационное обеспечение процесса функционирования СУ ГПС» реализует ввод и корректировку нормативно-справочной информации, подготовку данных для задач управления ГПС.

### **6.1.3 Структура технического обеспечения СУ ГПС**

Комплекс технических средств СУ ГПС на современном этапе базируется на фирменных средствах вычислительной техники, в том числе программируемых логических контроллерах и промышленных компьютерах, соединенных с УЧПУ посредством каналов связи и функционирующих как локальная сеть ЭВМ.

Применение локальных сетей на базе современной микропроцессорной техники позволяет существенно повысить надежность и живучесть системы управления ГПС не только за счет высокой надежности самих вычислительных средств, но и за счет децентрализации отдельных функций управления и обеспечения в процессе приема и передачи данных высокой помехоустойчивости канала связи. Вычислительные средства в СУ ГПС могут объединяться в звездообразные, иерархические и в неполносвязанные сети (рис. 6.7).

В качестве управляющего вычислительного комплекса на современном этапе используются промышленные ЭВМ (ПЭВМ), а на более низких уровнях программируемые логические контроллеры (ПЛК).

На рис. 6.7 (а, б, в, г, д, е) представлены соответственно звездообразная (радиальная), иерархическая, неполносвязанная (вариант 1), неполносвязанная (вариант 2) структуры, структура со связями шинного типа и структура со связями кольцевого типа. На рисунке приняты следующие обозначения. ТМ — обобщенный технологический модуль, под которым понимается станочное оборудование и транспортные средства. ПЛК — программируемые логические контроллеры, выполняющие функции



среды связи и ряд функций по непосредственному управлению оборудованием.

Каждый из приведенных типов сетей имеет свои области и условия применения. Так структура комплекса технических

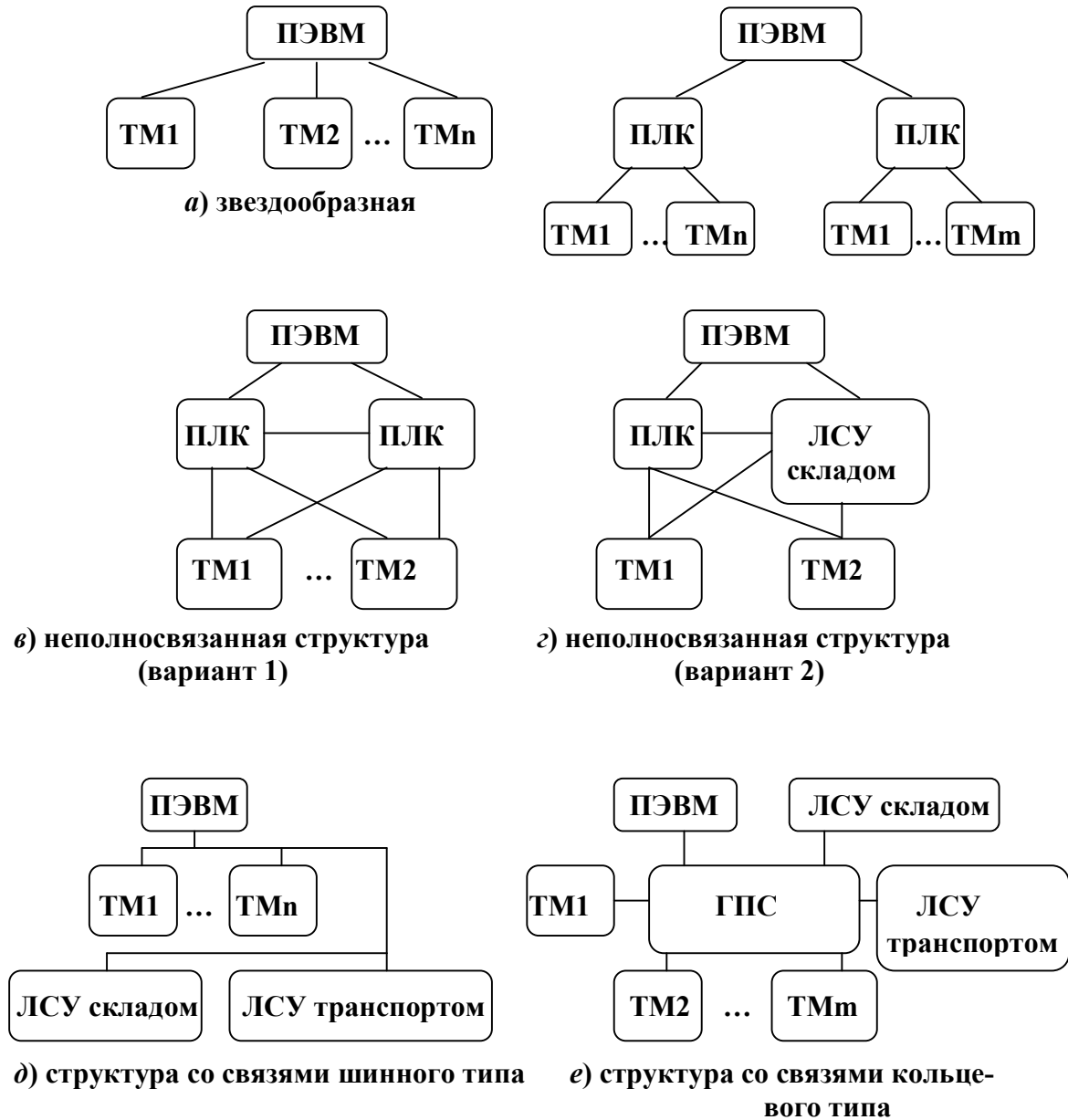


Рис. 6.7 — Структуры вычислительных средств

средств на базе сети шинного типа обеспечивает максимальный уровень устойчивости к отказам и рекомендуется при высоком уровне автоматизации и невысокой интенсивности управления.

Звёздообразная структура рекомендуется при развитых функциях автоматизации на уровне ТМ. Иерархическую сеть

рекомендуется применять по мере увеличения числа модулей ГПС. Неполносвязанные структуры (варианты 1, 2) рекомендуются при высоком уровне автоматизации ТМ и невысокой интенсивности управления ТМ. Они также обеспечивают высокую надежность функционирования сети. Структура сети со связями кольцевого типа употребляется при меньшей требуемой производительности и надежности.

ПЭВМ формирует сменно-суточные задания, рассчитывает технико-экономические показатели участка, ведет учет обеспеченности производства, формирует задания вспомогательным производствам, а также осуществляет диагностику отказов и контроль состояния оборудования.

ТМ производит прием сменно-суточных заданий, текста управляющих программ, обработку сменно-суточного задания, накопление и передачу данных о количестве готовых изделий.

ЛСУ складом обрабатывает заявки ТМ, обеспечивает информационное обеспечение склада, выдает задания транспорту. ЛСУ транспортом обрабатывает заявки от ТМ и ЛСУ складом, выдает сообщения о доставке грузов.

При таком распределении функций отказ ПЭВМ не влияет на работоспособность оборудования в течение длительного времени.

## **6.2 Структура гибкого производственного модуля**

В разделе 12 показано, что одной из производственных единиц ГПС является гибкий производственный модуль.

Гибкая производственная система в целом имеет многоуровневую иерархическую структуру. Нижний уровень ее составляют средства программного управления отдельными объектами (станок, пресс, робот, вспомогательный механизм). Эти объекты снабжены своими микропроцессорными средствами обработки информации и управления. Здесь же имеются устройства с датчиками состояния данного объекта и хода технологической операции. Информация обрабатывается в их собственной микропроцессорной части, где она обрабатывается и используется в местном кон-

туре управления. Обработанная информация затем поступает на следующий уровень ГПС — гибкий производственный модуль (ГПМ).

В состав модуля входит несколько станков, роботы, вспомогательные механизмы и т.д. Схема гибкого производственного модуля приведена на рис. 6.8.

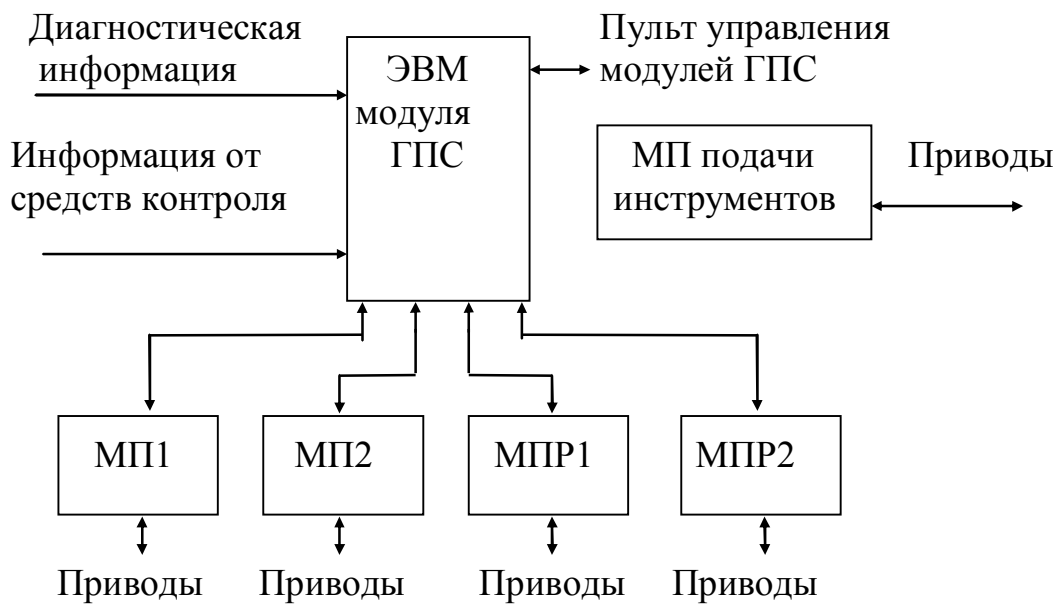


Рис. 6.8 — Схема гибкого производственного модуля

Микро ЭВМ модуля получает сигналы от каждого информационного объекта, входящего в модуль, формирует команды управления на каждый из объектов в соответствии с системой программного обеспечения. Она передает также необходимую информацию о состоянии и ходе технологического процесса на следующий уровень системы.

На рис. 6.8 обозначено: МП1, МП2 — микропроцессоры управления станками; МНР1, МНР2 — микропроцессоры управления роботами. Несколько модулей могут объединяться в гибкие автоматизированные участки или гибкие автоматизированные технологические линии.

В ГПС входят не только участки, линии, но и различные подсистемы, в которые включаются автоматизированные склады заготовок, инструмента и готовой продукции цеха; внутрицехо-

вой автоматический транспорт; технологические службы цеха; подразделения контроля готовой продукции.

Основной подсистемой ГПС является автоматизированный склад. Он имеет ячеистую конструкцию и каждая ячейка с помещенной в ней деталей имеет свой кодовый номер. Снаружи по вертикальным и горизонтальным рядам ячеек движется складской робот, который по определенным адресам загружает ячейки или вынимает из них нужные детали.

Структура ГПС показана на рис. 6.9.

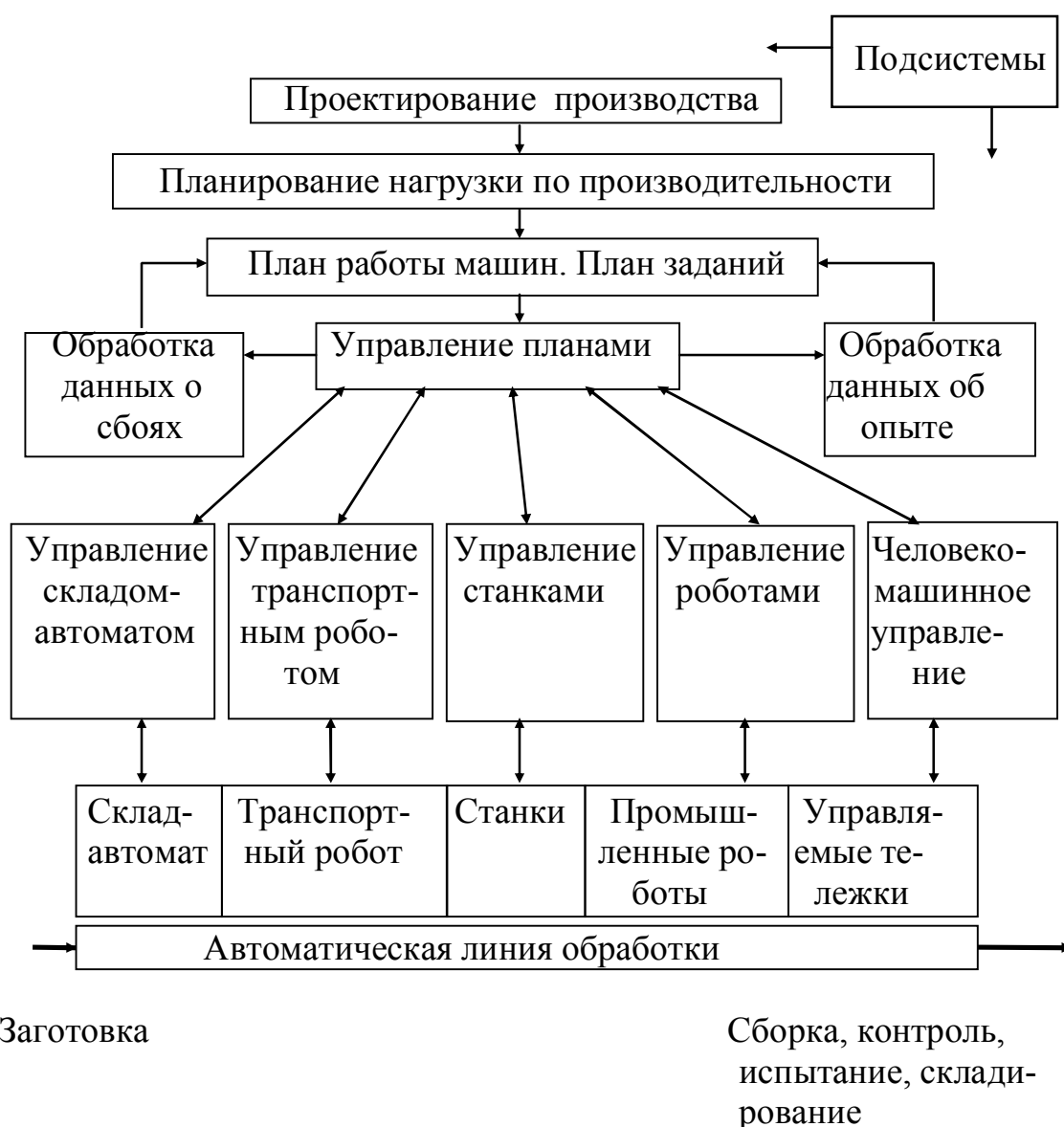


Рис. 6.9 — Структура ГПС

Подсистема автоматического цехового транспорта организована на базе автоматических транспортных тележек с роботом и без него, напольных безрельсовых автоматических тележек и подвесных транспортных устройств. Автоматические напольные тележки могут перемещаться по рельсам и без них. В безрельсовых транспортных средствах движение происходит вдоль ярко-белых полос, проложенных на полу. Считывание информации о положении тележки относительно полос происходит с помощью фотоматричных датчиков.

В ГПС основная нагрузка в производстве ложится на вычислительные устройства. Планирование, проектирование производства выполняет ЭВМ верхнего уровня — ЭВМ планирования производства. Непосредственным управлением обработкой занимается управляющая ЭВМ. Информация в управляющую ЭВМ поступает от микропроцессоров (микро ЭВМ) нижнего уровня. Для связи всех вычислительных устройств в ГПС существует сеть ЭВМ, объединяющая вычислительные устройства всех уровней (рис. 6.10).

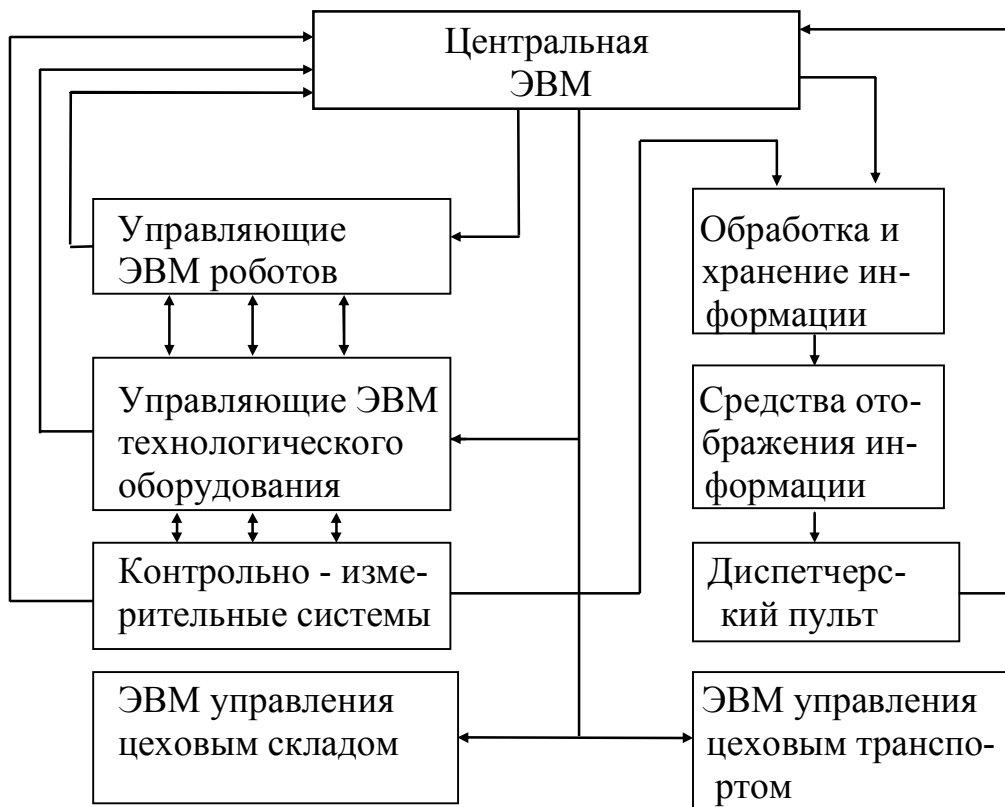


Рис. 6.10 — Сеть ЭВМ

Основными задачами, решаемыми сетью ЭВМ, являются задачи регулирования, логического управления и прогнозирования.

Задачи регулирования наиболее часто встречаются при управлении положением и скоростью движения различных исполнительных приводов станков, роботов, автоматических транспортных тележек, автоматических складов.

Задача логического управления рассматривает любой производственный модуль с точки зрения микро ЭВМ как логическую сеть, состоящую из конечных автоматов.

Задачи прогнозирования решаются, если при управлении нужно выполнять расчет и предсказание конечных значений параметров, изменяющихся во времени.

Не менее важной функцией сети ЭВМ является диагностирование вычислительных средств, а точнее самодиагностирование. Это одна из ключевых задач, преследующих цель повышения надежности всей аппаратуры управления ГПС в целом.

### **6.3 Структура программного обеспечения СУ ГПС**

Структура и состав унифицированного программного обеспечения (ПО) СУ ГПС приведены на рис. 6.11.

Базовое ПО СУ ГПС включает операционные системы, языки программирования, обслуживающие программы и драйверы стандартных устройств.

При управлении подготовкой производства базовое ПО обеспечивает работу как в пакетном, так и в диалоговом режимах обслуживания библиотек, создание и ведение файлов различной организации на внешних запоминающих устройствах. При управлении процессами базовое ПО обеспечивает запоминание задач для обеспечения работы системы в реальном времени, осуществляет многоуровневую систему прерываний с приоритетной системой обслуживания, реализует режим прямого доступа в память для обмена с высокоскоростными внешними устрой-

ствами, включает драйверы стандартных и нестандартных устройств.

Для разработки пакета прикладных программ (ППП) и задач СУ ГПС могут быть применены операционные системы и соответствующие языки программирования.

Общесистемное программное обеспечение включает в себя средства управления ГПС, организации и ведения информационной базы СУ ГПС, диагностики, оптимизации и моделирования.

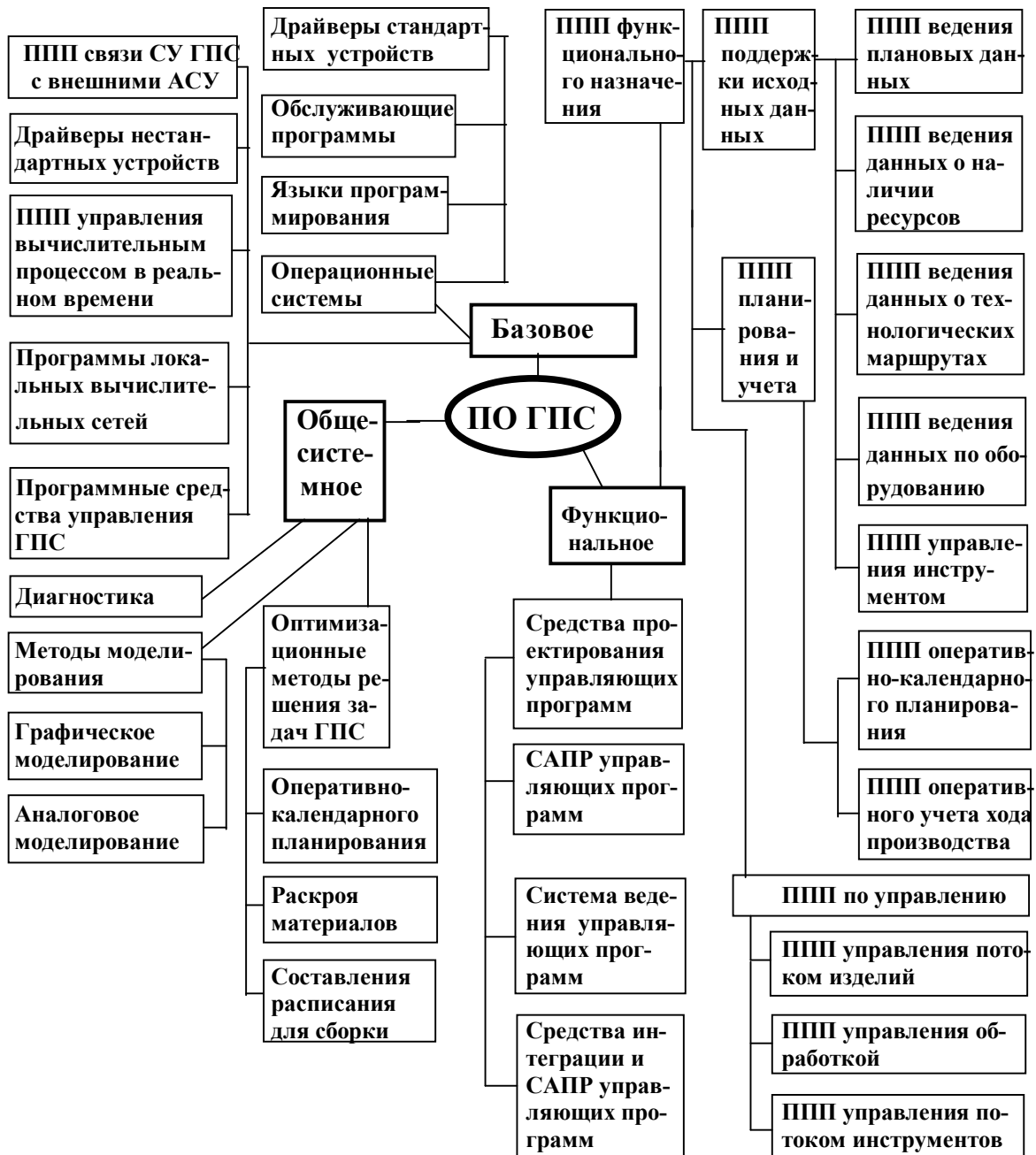


Рис. 6.11 — Программное обеспечение ГПС

Эффективность работы ГПС находится в зависимости от оптимальности плана-графика изготовления деталей с учетом взаимозаменяемости технологических модулей, расписания сборки, раскроя материалов и т. д. Для этого существует программное обеспечение методов оптимизации, используемой, например, в подсистеме оперативно-календарного планирования для решения соответствующих задач оптимизации.

Функциональное ПО СУ ГПС включает средства проектирования и передачи управляющих программ, а также комплекс модулей для реализации различных функций СУ ГПС, а именно:

- функции оперативно-календарного планирования, учета и управления подготовкой производства, поддержки базы данных системы, выбора и детализации плана производства до операционного графика обработки на сутки, смену, взаимодействия с АСУП и САПР;
- функции управления технологическим процессом производства;
- функции локального управления технологическим оборудованием, реализуемые с помощью контроллеров.

Наибольший интерес в данном разделе представляет ППП по управлению, при работе которого осуществляется:

- обеспечение инструментами, необходимыми для выполнения определенной операции станком;
- приведение станка в требуемое УП состояние, а также приведение управляющей программы в вид, соответствующий текущему местоположению инструментов в магазине и количеству деталей в приспособлении;
- непосредственное управление обработкой партии деталей;
- управление очередью заявок на перемещение предметов, управление действиями транспорта, роботов, складского оборудования;
- управление очередью заявок на обработку, загрузки подготовленных для выполнения управляющих программ в соответствующие станки с ЧПУ, управление состоянием оборудования



во время выполнения УП и обеспечения обратной связи при диагностике состояния оборудования.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. — СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2005. — 412 с.
2. Власов А.И., Сулимов Ю.И. Электронные промышленные устройства: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. — 255 с.
3. Степанов В.П. Состояние и перспективы развития роботостроения в стране // ТЕХНОЛОГИЯ. Сер. Гибкие производственные системы и робототехника. — 1991. — Вып. 4. — С. 3—8.
4. Попов Е.П. Основы робототехники. — М.: Высшая школа, 1990. — 223 с.
5. Накано Э. Введение в робототехнику. — М.: Мир, 1988. — 334 с.
6. Фридмен М. Проектирование систем с микрокомпьютерами. — М.: Мир, 1986. — 405 с.
7. 935.84.005.00.00.000 ТО. Техническое описание и инструкция по эксплуатации промышленного робота РМ 104, 1985. — 57 с.
8. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 624 с.

