

Е. И. Юревич

ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ

3-е издание

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
дипломированных специалистов 652000 «Мехатроника и робототехника»
(специальность 210300 «Роботы и робототехнические системы»)

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»

2010

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.816я73
Ю68

Юревич Е. И.

Ю68 Основы робототехники: учеб. пособие. — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 368 с.: ил. + CD-ROM — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-94157-942-6

Рассмотрена история становления робототехники как современной отрасли науки и техники от первых попыток создания "механических людей" до современных роботов и перспективы ее дальнейшего развития. Описано устройство роботов и близких им средств робототехники, приведены способы управления роботами от программного до интеллектуального, принципы проектирования. Широко представлено применение роботов в различных отраслях народного хозяйства и в других областях человеческой деятельности. В третьем издании книги учтены последние достижения стремительно развивающейся отрасли, включая мини- и микроробототехнику, искусственный интеллект, космическую робототехнику и др.

К книге прилагается компакт-диск с динамическими иллюстрациями и комментариями автора.

Для студентов технических вузов, разработчиков роботов и их пользователей

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.816я73

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Татьяна Лапина</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Рецензенты:

В. М. Лохин, д. т. н., профессор кафедры "Проблемы управления", первый проректор МИРЭА;

О. А. Тягунов, к. т. н., доцент кафедры "Проблемы управления" МИРЭА;

А. М. Потапов, д. т. н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, завкафедрой "Мехатроника и робототехника" БГТУ "Военмех".

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 30.09.09.

Формат 70×100^{1/8}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,67.

Тираж 1500 экз. Заказ № 3980

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953 Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диалозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-94157-942-6

© Юревич Е. И., 2009

© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	1
ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ	7
1.1. Предыстория робототехники	7
1.2. Возникновение и развитие современной робототехники	9
1.3. Развитие отечественной робототехники	16
ГЛАВА 2. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯМИ ЧЕЛОВЕКА	21
2.1. Постановка задачи	21
2.2. Общая схема управления движением человека	21
2.3. Динамические уровни управления движением	33
2.4. Tактический уровень управления движением	38
2.5. Стратегический уровень управления движением	40
2.6. Интеллект и творчество	42
ГЛАВА 3. УСТРОЙСТВО РОБОТОВ	47
3.1. Состав, параметры и классификация роботов	47
3.2. Манипуляционные системы	51
3.3. Рабочие органы манипуляторов	63
3.4. Системы передвижения мобильных роботов	67
3.5. Сенсорные системы	78
3.6. Способы и устройства управления робототехническими системами	85
3.7. Особенности устройства других средств робототехники	87
ГЛАВА 4. ПРИВОДЫ РОБОТОВ	91
4.1. Классификация приводов	91
4.2. Пневматические приводы	93

4.3. Гидравлические приводы	97
4.4. Электрические приводы	98
4.5. Рекуперация энергии в приводах	99
4.6. Искусственные мышцы	100
4.7. Микроприводы	103
ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОБОТОВ	105
5.1. Основные принципы организации движения роботов	105
5.2. Математическое описание манипуляторов	107
5.2.1. Математическое описание механической системы манипуляторов.....	108
5.2.2. Взаимное влияние степеней подвижности манипуляторов	118
5.2.3. Учет упругости звеньев манипулятора	121
5.2.4. Математическое описание приводов	125
5.2.5. Математическое описание манипулятора с приводами	126
5.3. Математическое описание систем передвижения роботов.....	128
5.4. Математическое описание человека-оператора	129
5.5. Компьютерное моделирование робототехнических систем	131
ГЛАВА 6. ДИСКРЕТНОЕ ЦИКЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ	135
6.1. Особенности цикловых систем управления роботов.....	135
6.2. Цикловое управление отдельным приводом	136
6.3. Совместное цикловое управление приводами манипуляторов	137
6.4. Резонансные цикловые приводы	139
ГЛАВА 7. ДИСКРЕТНОЕ ПОЗИЦИОННОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ	141
7.1. Особенности дискретного позиционного управления.....	141
7.2. Дискретное позиционное управление отдельным приводом.....	142
7.3. Совместное дискретное позиционное управление приводами манипулятора.....	149
7.4. Общий порядок исследования динамики и синтеза алгоритмов дискретного позиционного программного управления.....	151
ГЛАВА 8. НЕПРЕРЫВНОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ	153
8.1. Особенности непрерывного (контурного) управления роботами	153
8.2. Непрерывное управление отдельным приводом	157
8.2.1. Непрерывное управление приводом с последовательной коррекцией.....	158

8.2.2. Непрерывное управление приводом с коррекцией с помощью обратных связей	158
8.3. Робастные системы непрерывного управления приводами	160
8.3.1. Системы непрерывного управления с обратной связью по ускорению	160
8.3.2. Релейные системы управления	164
8.4. Совместное непрерывное управление приводами манипулятора	166
8.4.1. Системы совместного непрерывного управления приводами манипулятора с последовательной коррекцией (с компенсатором)	167
8.4.2. Системы совместного управления приводами манипулятора с динамической коррекцией с помощью обратных связей	172
8.5. Системы управления манипулятором совместно по положению и силе	175

ГЛАВА 9. АДАПТИВНОЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

183

9.1. Функциональная схема системы сенсорного (очувствленного) управления роботом	183
9.2. Системы адаптивного управления	185
9.2.1. Адаптивное управление отдельным приводом	187
9.2.2. Адаптивное управление манипулятором	189
9.3. Системы интеллектуального управления	192
9.4. Особенности управления средствами передвижения роботов	203

ГЛАВА 10. УПРАВЛЕНИЕ СРЕДСТВАМИ РОБОТОТЕХНИКИ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ

207

10.1. Человеко-машинные системы	207
10.2. Классификация систем управления средствами робототехники человеком-оператором	208
10.3. Системы командного управления	211
10.4. Системы копирующего управления манипулятором	211
10.5. Системы управления с задающей рукояткой	218
10.6. Системы супервизорного и интерактивного управления	221
10.7. Особенности управления человеком-оператором средствами передвижения	224

ГЛАВА 11. ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

227

11.1. Задачи группового управления	227
11.2. Групповое управление в живой природе и в обществе	228
11.3. Принципы группового управления роботами	231

ГЛАВА 12. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ.....	243
12.1. Развитие устройств управления роботов	243
12.2. Современные устройства управления средств робототехники и тенденции их развития	246
ГЛАВА 13. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ	251
13.1. Особенности проектирования средств робототехники	251
13.2. Методы проектирования средств робототехники	254
ГЛАВА 14. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	259
14.1. Классификация технологических комплексов с применением роботов	259
14.2. Компоновки технологических комплексов с роботами	263
14.3. Управление технологическими комплексами	267
14.4. Особенности роботизации технологических комплексов в действующих производствах	269
14.5. Гибкие производственные системы	272
ГЛАВА 15. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ НА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ.....	275
15.1. Классификация технологических комплексов с роботами на основных технологических операциях	275
15.2. Сборочные робототехнические комплексы.....	275
15.3. Сварочные робототехнические комплексы	280
15.4. Робототехнические комплексы для нанесения покрытий.....	283
ГЛАВА 16. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ НА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ.....	287
16.1. Классификация роботизированных технологических комплексов.....	287
16.2. Роботизированные технологические комплексы механообработки.....	287
16.3. Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки.....	290
16.4. Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве	292
16.5. Роботизированные технологические комплексы литья под давлением.....	293

ГЛАВА 17. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ В НЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ И В НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ОТРАСЛЯХ	297
17.1. Особенности применения средств робототехники в немашиностроительных отраслях	297
17.2. Робототехника в непромышленных отраслях	305
ГЛАВА 18. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА	309
18.1. Экстремальная робототехника в промышленности	309
18.2. Космическая робототехника	314
18.3. Подводные роботы	319
18.4. Военная робототехника	321
18.5. Микроробототехника	323
ГЛАВА 19. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОБОТОТЕХНИКИ	327
19.1. Социально-экономическая эффективность применения средств робототехники	327
19.2. Техника безопасности в робототехнике	331
ГЛАВА 20. РОБОТОТЕХНИКА ЗАВТРА	335
ПРИЛОЖЕНИЯ	345
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ДВИЖЕНИЙ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ	347
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОПИСАНИЕ КОМПАКТ-ДИСКА	353
ЛИТЕРАТУРА	355
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	357

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга — третье переработанное издание одноименной книги, впервые изданной в 1985 г., как первый отечественный учебник по робототехнике. В 2001 г. на ее основе небольшим тиражом для студентов СПбГПУ были изданы два учебных пособия — "Робототехника" и "Управление роботами и робототехническими системами". В 2005 г. на основе этих книг было осуществлено второе издание учебного пособия "Основы робототехники". Настоящее издание существенно дополнено результатами, достигнутыми в быстро развивающейся робототехнике.

Учебное пособие отработано на опыте преподавания одноименной дисциплины студентам кафедры "Робототехника и техническая кибернетика" факультета СПбГПУ при Центральном научном и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики (УНИИРТК).

Книга предназначена для студентов технических вузов, а также широкого круга специалистов по робототехнике и автоматизации.

ВВЕДЕНИЕ

Предмет робототехники — это создание роботов, других средств робототехники и основанных на них технических систем и комплексов различного назначения. Возникнув на основе кибернетики и механики, робототехника в свою очередь породила новые направления развития и самих этих наук. В кибернетике это связано прежде всего с интеллектуальным управлением и бионикой как источником новых, заимствованных у живой природы идей, а в механике — с многостепенными механизмами типа манипуляторов.

Робот можно определить как универсальный автомат для осуществления механических действий, подобных тем, которые производит человек, выполняющий физическую работу. При создании первых роботов и вплоть до наших дней образцом для них служат возможности человека. Именно стремление заменить человека на тяжелых и опасных работах породило идею робота, затем первые попытки ее реализации (в Средние века) и, наконец, обусловило возникновение и развитие современной робототехники и роботостроения.

На рис. В.1 показана функциональная схема робота. В общем виде она включает исполнительные системы — манипуляционную (один или несколько манипуляторов) и передвижения (транспортную), информационно-управляющую, информационно-измерительную (сенсорную), дающую информацию о внешней среде и систему связи с оператором, а также с другими взаимодействующими с роботом машинами. Исполнительные системы в свою очередь состоят из механической системы (механизма) и системы приводов. Механическая система манипулятора — аналог руки человека — это обычно кинематическая цепь, состоящая из подвижных звеньев с угловым или поступательным перемещением, которая заканчивается каким-нибудь рабочим инструментом или захватным устройством.

Со временем понятие "робот" расширилось и под ним часто стали понимать любую автоматическую машину, заменяющую человека и чем-то напоминающую его разумное поведение.

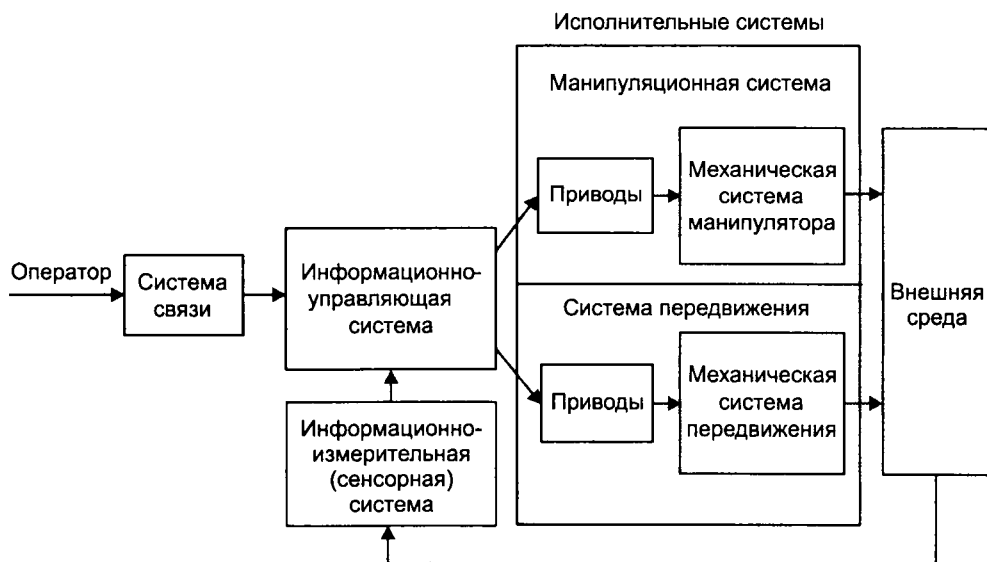


Рис. В.1. Функциональная схема робота

Из данного определения робота следует, что — это машина автоматического действия, которая объединяет свойства различного типа из их классификации — технологических, транспортных, информационных, являясь, таким образом, принципиально новым видом машин, которых не было в этой классификации. В достаточно развитом виде роботы аналогично человеку осуществляют активное силовое и информационное взаимодействие с окружающей средой и благодаря этому могут не только обладать искусственным интеллектом, но и совершенствовать его. Правда, пока роботы еще очень далеки по своим интеллектуальным возможностям от человека. От ранее известных видов машин роботы также принципиально отличаются своей *универсальностью* (многофункциональностью) и *гибкостью* (возможностью быстрого перехода к выполнению новых операций).

В основе универсальности роботов лежит универсальность его рабочих органов, хотя сегодня до универсальности руки человека им еще очень далеко. (Правда, это компенсируется возможностью быстрой смены рабочих органов робота в процессе выполнения операций.)

Универсальность роботов предполагает возможность выполнения ими различных целенаправленных действий, требующих определенных интеллектуальных способностей. Это открывает широкие возможности использования роботов в качестве как основного технологического оборудования (на сборке, сварке, окраске и т. п.), так и вспомогательного — для замены рабочих, занятых обслуживанием такого оборудования.

Универсальность роботов позволяет им осуществлять любые операции, выполняемые человеком, а быстрота перестройки на реализацию новых операций сохраняет у автоматизируемого с участием роботов производства ту же гибкость в отношении быстроты освоения новой продукции, какую сегодня имеют только производства, обслуживаемые человеком. Современные роботы потому и появились лишь во второй половине XX столетия, что именно в это время назрела необходимость в таких универсальных и гибких средствах, без которых невозможно осуществить комплексную автоматизацию современного производства с его большой номенклатурой и частой сменяемостью выпускаемой продукции, т. е. создание гибких автоматизированных производств.

Дальнейшее развитие робототехники привело к расширению сферы ее применения, включая создание с ее помощью новых технических систем, принципиально невозможных при участии или даже присутствии человека.

Термин "робот", как известно, придумал известный писатель К. Чапек в 1920 г. в своей фантастической пьесе "R.U.R." ("Россумовские универсальные роботы"), в которой так названы механические рабочие, предназначенные для замены людей на тяжелых работах. Название "робот" образовано от чешского слова *robota*, что означает тяжелый подневольный труд.

Помимо роботов для тех же целей широкое применение получили манипуляторы, управляемые человеком (копирующие манипуляторы, телеоператоры и т. п.), а также однопрограммные (не перепрограммируемые) автоматические манипуляторы (автооператоры и механические руки). Эти устройства явились предшественниками роботов. Появились они главным образом для манипулирования объектами, непосредственный контакт с которыми для человека вреден или опасен (радиоактивные, химически активные, взрывоопасные изделия, раскаленные болванки и т. п.). Однако, хотя появление роботов существенно сузило сферу применения этих простых средств механизации и автоматизации, они не потеряли своего значения в силу простоты и дешевизны. Сегодня все они вместе с роботами образуют общее понятие средств робототехники.

Как уже было отмечено, объективной причиной возникновения и развития современной робототехники явилась, прежде всего, историческая потребность производства в гибкой автоматизации с устранением человека из непосредственного участия в машинном производстве и недостаточность для этой цели традиционных средств автоматизации. Поэтому второй задачей робототехники наряду с созданием собственно средств робототехники является разработка основанных на них систем и комплексов различного назначения.

Наряду с внедрением в действующие производства роботы открывают широкие перспективы для создания принципиально новых технологических про-

цессов, не связанных с весьма обременительными ограничениями, налагаемыми непосредственным участием в них человека. При этом имеются в виду как действительно очень ограниченные физические возможности человека (по грузоподъемности, быстродействию, точности, повторяемости и т. п.), так и требуемая для него комфортность условий труда (качество атмосферы, отсутствие вредных внешних воздействий и т. д.). Сегодня непосредственное участие человека в технологическом процессе зачастую является серьезным препятствием для дальнейшей интенсификации производства и создания соответствующих новых технологий.

Роботы получили наибольшее распространение в промышленности и, прежде всего, в машиностроении. Предназначенные для этой цели роботы называют *промышленными роботами* (ПР). Не менее широкие перспективы имеют роботы в горнодобывающей промышленности, металлургии и нефтяной промышленности (обслуживание бурильных установок, монтажные и ремонтные работы), в строительстве (монтажные, отделочные, транспортные работы), в легкой, пищевой, рыбной промышленности.

Применение роботов не только приносит конкретный технико-экономический эффект, связанный с повышением производительности труда, сменности работы оборудования и качества продукции, но и является важным средством решения социальных проблем, позволяя освобождать людей от тяжелого, опасного и монотонного труда.

Наряду с использованием в промышленности роботы применяются и в других областях народного хозяйства и вообще человеческой деятельности: в сфере обслуживания, на транспорте (включая создание шагающих транспортных машин), в сельском хозяйстве, медицине (протезирование, хирургия, обслуживание больных и инвалидов), для исследования и освоения океана и космоса, выполнения работ в других экстремальных условиях (стихийные бедствия, аварии, военные действия), в научных исследованиях.

ГЛАВА 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

1.1. Предыстория робототехники

История робототехники уходит корнями в глубокую древность, когда впервые возникла идея и были предприняты первые попытки создания человекоподобных устройств в виде подвижных статуй, механических слуг и т. п. Статуи богов с подвижными частями тела (руками, головой) появились еще в Вавилоне, Древнем Египте, Китае.

В "Илиаде" Гомера божественный кузнец Гефест выковывает механических служанок. Аристотель упоминает о приводимых в движение с помощью ниток куклах, из которых создавались целые механические театры. До нас дошли книги Герона Александрийского (I в. до н. э.), в которых описаны подобные и многие другие автоматы древности. В качестве источника энергии в них применялись вода, пар, гравитация (гири).

В Средние века большой популярностью пользовались различного рода автоматы, основанные на использовании часовых механизмов. Были созданы всевозможные часы с движущимися фигурами людей, ангелов и т. п. К этому периоду относятся сведения о появлении первых подвижных человекоподобных механических фигур, получивших позднее название *андройды*. Так, андроид алхимика Альберта Великого (1193—1280) представлял собой куклу ростом с человека, которая, когда стучали в дверь, открывала и закрывала ее, кланяясь при этом входящему.

Кстати, в Средние века было высказано предположение о возможности создания *гомункулуса* (живого человечка) средствами алхимии. Создание такого гомункулуса химическим путем, в колбе, описывает Гете в "Фаусте":

Нам говорят "безумец" и "фантаст",
Но, выйдя из зависимости грустной,
С годами мозг мыслителя искусный
Мыслителя искусственно создаст.

Работы по созданию андроидов достигли наибольшего развития в XVIII в. одновременно с расцветом часового мастерства. Механиками-часовщиками были созданы андроиды-музыканты, рисовальщики, писцы. К ним относится, например, "флейтист" французского механика Жака Вокансона (1709—1789) — фигура ростом с человека, которая подвижными пальцами исполняла 11 мелодий с помощью заложенной в нее программы.

Целый ряд человекоподобных автоматов был создан швейцарскими часовщиками Пьером-Жаком Дро (1721—1790) и его сыном Анри Дро (1752—1791). От имени последнего позднее было образовано название "андроид". Эти человекоподобные игрушки представляли собой многопрограммные автоматы с оперативно сменяемыми программами. Программы задавались с помощью сменных штырьков, устанавливаемых на вращающемся барабане, и других подобных механических устройств. Привод осуществлялся от часового механизма (рис. 1.1 и 1.2).



Рис. 1.1. Механический писец
Анри Дро

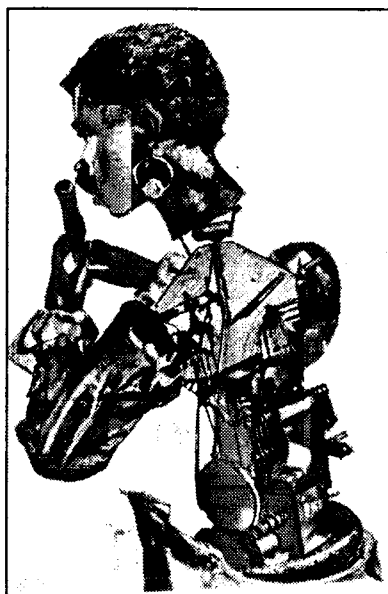


Рис. 1.2. Механический негр-флейтист
(XIX в., Парижский национальный музей)

Из отечественных устройств подобного типа можно вспомнить знаменитые часы "яичной" формы с театральным автоматом И. П. Кулибина (1735—1818). В 1820 г. в Петербурге был открыт "Храм очарований" А. И. Галуцкого, обслуживаемый механическими слугами. В 1866 г. И. Мезгин создал "астрономо-исторические" часы, которые помимо времени показывали четыре сценки из истории г. Томска.

Интерес к созданию "механических" людей, начавший было затухать вместе с ослаблением роли часового дела, в дальнейшем вновь возродился в XX в. благодаря развитию электротехники и электроники. Американский инженер Венсли построил управляемый на расстоянии с помощью свистка автомат "Телевокс", который мог не только выполнять ряд элементарных операций, но и произносить с помощью звукозаписывающей аппаратуры несколько фраз. Англичанин Гарри Мей в 1932 г. создал человекоподобный автомат "Альфа", который по командам, подаваемым голосом, садился и вставал, двигал руками, произносил несколько фраз. Несколько подобных автоматов под названием "Сабор" были созданы в Австрии Августом Губером. Они управлялись по радио, могли ходить, говорить, выполнять различные манипуляции. В основном такие устройства создавались в рекламных целях, хотя делались попытки использовать их и для различных практических задач.

В 1937 г. на Всемирной выставке в Париже демонстрировался радиоуправляемый подвижный робот, созданный советским восьмиклассником В. Машкевичем. К этому времени уже окончательно "прижился" термин "робот", а идеи робототехники все более энергично использовались в научно-фантастической литературе.

1.2. Возникновение и развитие современной робототехники

Современная робототехника, как уже было отмечено, сформировалась во второй половине XX столетия, когда в ходе развития производства возникла реальная потребность в манипуляционных машинах-автоматах, подобных "механическим людям", описанным К. Чапеком, и одновременно появились необходимые для их создания научно-технические предпосылки и, прежде всего, цифровая и вычислительная техника.

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

Впервые такие манипуляторы были созданы в 1940—1950 гг. для атомных исследований, а затем и для атомной промышленности (рис. 1.3 и 1.4). Подобные устройства стали применяться в глубоководной технике, металлургии и ряде других отраслей промышленности.

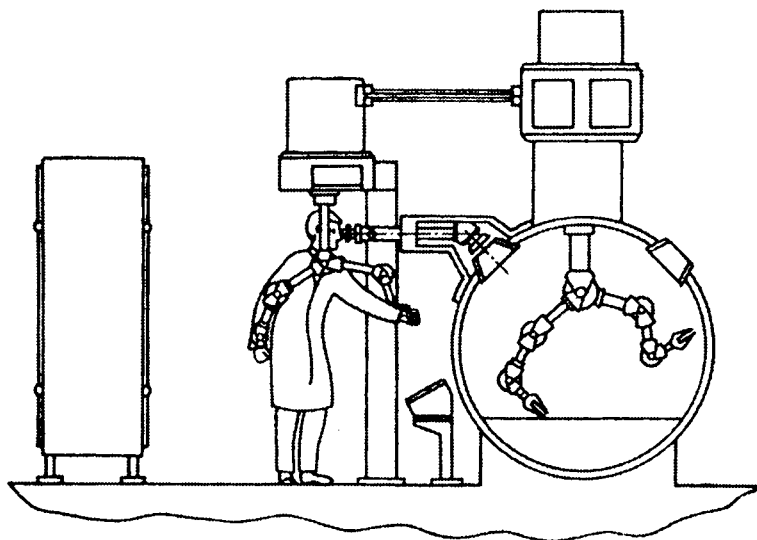


Рис. 1.3. Горячая камера с копирующим манипулятором

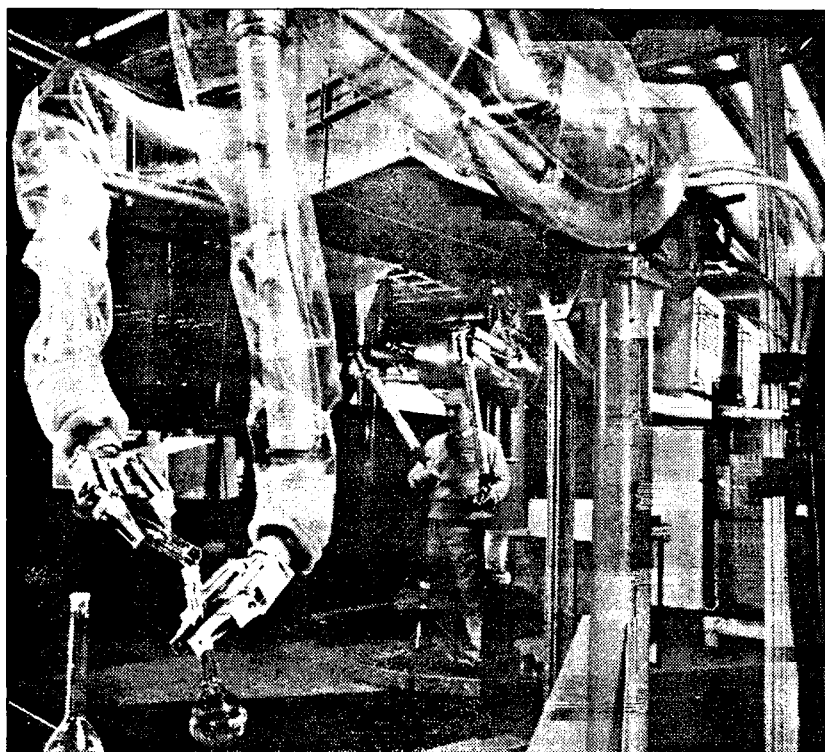


Рис. 1.4. Современный копирующий манипулятор Mascot (TELEROBOT, Италия)

Первые полностью автоматически действующие манипуляторы были созданы в США в 1960—1961 гг. В это же время были разработаны экспериментальные образцы первых снабженных сенсорными устройствами роботов с адаптивным управлением.

В 1962 г. на рынке США появились первые роботы марки Versatran, предназначенные для промышленного применения (рис. 1.5), и роботы Unimate-1900, которые получили первое применение в автомобильной промышленности на заводах фирм "Дженерал моторс", "Форд" и "Дженерал электрик" (рис. 1.6).

Одновременно возник термин "промышленный робот" (Industrial Robot).

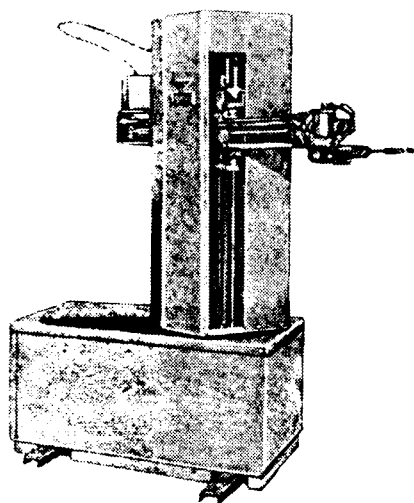


Рис. 1.5. Промышленный робот Versatran (AMF, США)

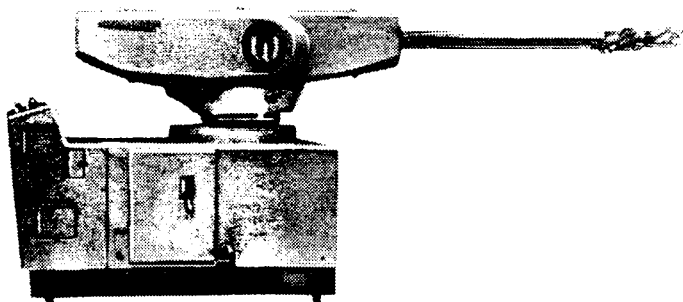


Рис. 1.6. Промышленный робот Unimate-1900 (Unimation, США)

Хронология дальнейшего развития производства роботов такова:

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

Динамика последующего роста парка роботов в мире:

Год	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Количество роботов (тыс. шт.)	8,5	30	90	400	800	1200	4000	7000 (прогноз)

Парк роботов в мире возрастает в год в среднем на 20 %, и в 1998 г. он превысил 1 млн шт.

До 2000 г. основную часть парка составляли промышленные роботы, а затем начала стремительно возрастать доля так называемых сервисных или персональных сравнительно дешевых роботов для чистки помещений, мойки окон и тому подобных домашних работ, а также роботов-игрушек. К 2005 году доля таких роботов превысила 70 % общего парка.

За последние 10 лет XX столетия стоимость промышленных роботов упала в 5 раз при одновременном улучшении их технических характеристик. В результате возросла экономическая эффективность использования роботов.

Первое место в мире по производству и применению роботов уверенно занимает Япония, где сосредоточена большая часть мирового парка роботов. Далее следуют США, Германия, Италия, Франция, Швеция. Большая часть этого парка используется в промышленности, примерно половина — для выполнения основных технологических операций, где требуются наиболее сложные роботы. Доля таких роботов неуклонно растет.

Технический прогресс в развитии роботов направлен прежде всего на совершенствование управления. Первые промышленные роботы имели программное управление, в основном заимствованное у станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Из станкостроения были взяты и приводы. Эти роботы получили название роботов первого поколения. Второе поколение роботов — это осязательные роботы, т. е. снабженные сенсорными системами, главными из которых являются системы технического зрения (СТЗ).

Первые промышленные роботы с развитым осязанием и микропроцессорным управлением появились на рынке и получили практическое применение в 1980—1981 гг. прежде всего на сборке, дуговой сварке, контроле ка-

чества и для взятия неориентированных предметов, например, с конвейера. Доля таких устройств в общем парке роботов неуклонно растет и приближается к 50 % несмотря на то, что они в несколько раз дороже роботов с программным управлением и значительно сложнее в обслуживании. Однако это окупается неизмеримо большими функциональными возможностями, а следовательно, и более широкой областью применения.

На рубеже XXI в. робототехника подошла к следующему этапу своего развития — созданию роботов третьего поколения — интеллектуальных роботов. Это стало естественным этапом совершенствования роботов, соответствующим исходной идее роботов как заменителей людей в их профессиональной деятельности. Интеллектуальный робот — это робот конкретного назначения, в основных системах которого используются методы искусственного интеллекта, что позволяет еще более расширить сферу применения робототехники практически на все области человеческой деятельности. Первые такие роботы уже начинают появляться на рынке.

В 1969 г. в США в рамках работ по искусственному интеллекту был разработан экспериментальный макет подвижного робота Shakey с развитой системой сенсорного обеспечения, включая техническое зрение, обладавшего элементами искусственного интеллекта, что позволило ему целенаправленно передвигаться в заранее неизвестной обстановке, самостоятельно принимая необходимые для этого решения (рис. 1.7).

В 1971 г. в Японии также были разработаны экспериментальные образцы роботов с техническим зрением и элементами искусственного интеллекта, способные самостоятельно осуществлять механическую сборку простых объектов.

В этот же период и в ряде других стран создаются подобные экспериментальные установки так называемых интегральных роботов, включающих в себя манипуляторы, управляющие ЭВМ, различные средства осязания и общения с человеком-оператором, которые предназначены для проведения исследований в области искусственного интеллекта и создания интеллектуальных роботов.

Одновременно начались работы в новой специфической области робототехники, занимающейся созданием шагающих машин как принципиально нового транспортного средства повышенной проходимости, образцом для которого являются ноги животных и человека. Были созданы экспериментальные образцы четырех- и шестиногих транспортных машин, а также протезов ног человека, так называемых экзоскелетов, для парализованных и тяжелобольных (рис. 1.8).

В конце XX в. возродился интерес к роботам-андроидам. В отличие от их первых реализаций последние достижения робототехники сделали возмож-

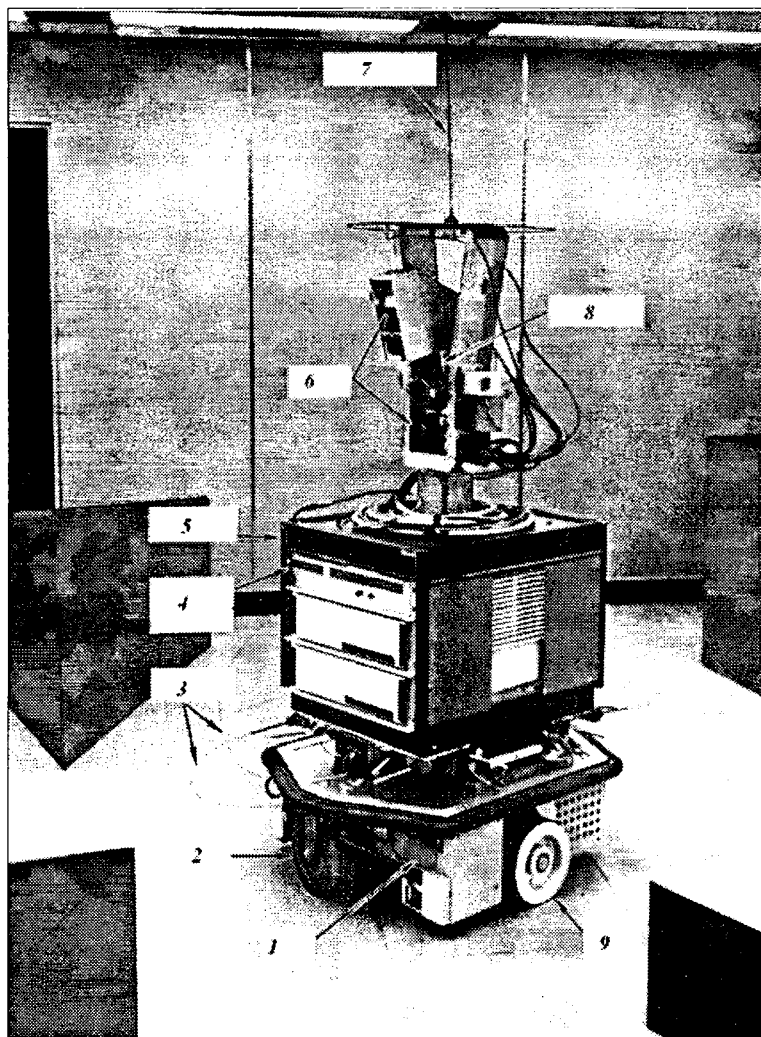


Рис. 1.7. Лабораторный интегральный мобильный робот Shakey (Stanford Research Institute, США): 1 — привод колеса 9; 2 — ролик; 3 — датчик контакта; 4 — устройство управления телевизионной камерой; 5 — бортовое устройство управления роботом, связанное со стационарной ЭВМ; 6 — неподвижный оптический дальномер; 7 — антенна системы радиосвязи; 8 — подвижная телевизионная камера; 9 — одно из двух мотор-колес

ным создание подобных устройств для обеспечения вполне реальных потребностей. На рис. 1.9 показан образец подобного робота. Он способен двигаться по лестнице и преодолевать другие препятствия, выполнять весьма сложные манипуляции и вести диалог с человеком. Робот предназначен для домашних работ, может быть гидом, экскурсоводом и т. п. Такие роботы получили название гуманоидные.

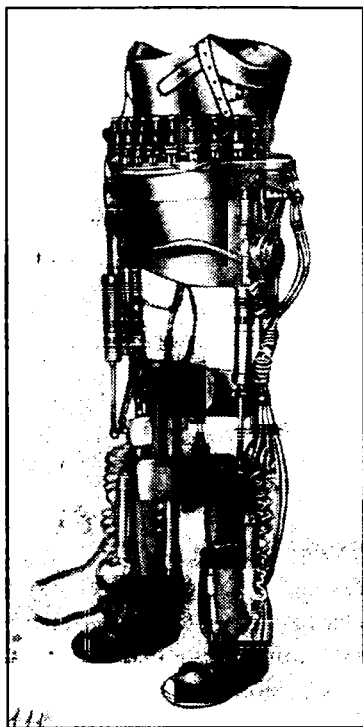
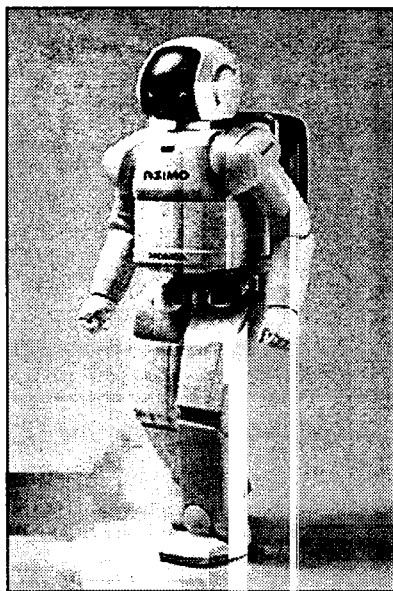


Рис. 1.8. Экзоскелетон

Рис. 1.9. Гуманоидный робот Asimo
(Honda motors, Япония)

Наряду с описанным процессом совершенствования способов управления роботами вплоть до их интеллектуализации еще одной тенденцией развития робототехники стала миниатюризация. Оба эти направления соответствуют общей тенденции развития техники в целом. В робототехнике процесс миниатюризации развивается путем создания все меньших размеров прежде всего мобильных роботов сперва мини-, а затем и микроразмерностей. Основное их назначение сегодня — это обследование малых замкнутых пространств и выполнение в них различных манипуляционных операций. На рис. 1.10 показан пример микроманипулятора для точного позиционирования образцов в электронном микроскопе. Манипулятор имеет 4 степени подвижности, минимальный шаг — 20 нм.

Как уже упоминалось во введении, одним из основных направлений применения роботов, которое в значительной мере определяет и проблематику, и темпы развития современной робототехники в целом, является комплексная автоматизация производства, создание гибких автоматизированных производств. Роботы как универсальное гибкое средство для выполнения в первую очередь манипуляционных действий — важный компонент таких производств.

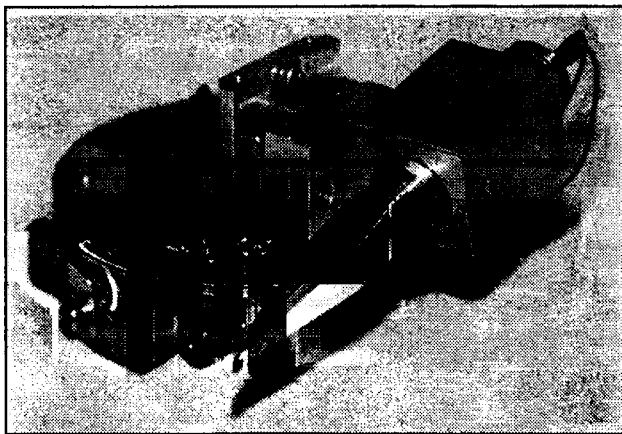


Рис. 1.10. Микроманипулятор для перемещения образцов в электронном микроскопе (проект Miniman, Европа)

История гибкой автоматизации началась в 1955 г. с появления станков с ЧПУ. Именно такого типа автоматическое технологическое оборудование с легко сменяемыми программами работы является основой для создания гибких, т. е. быстро перестраиваемых на выпуск новой продукции, производств. Именно для реализации идеи комплексной гибкой автоматизации и потребовались роботы как универсальное гибкое средство для обработки информации и роботы как универсальное гибкое средство для манипуляционных действий, требующихся как для выполнения ряда основных технологических операций (сборка, сварка, окраска и т. п.), так и многочисленных вспомогательных операций по обслуживанию технологического оборудования.

Одновременно роботы начинают все более широко проникать и в другие отрасли хозяйства, включая горное дело, металлургию, строительство, транспорт, легкую и пищевую промышленность, сельское хозяйство, освоение океана и космоса, военное дело, а также медицину и сферу обслуживания (сервисные роботы).

1.3. Развитие отечественной робототехники

Первые результаты по созданию и практическому применению роботов в СССР относятся к 1960-м гг. В 1966 г. в институте ЭНИКмаш (г. Воронеж) был разработан автоматический манипулятор с простым цикловым управлением для переукладывания металлических листов.

В 1968 г. в СССР (Институтом океанологии Академии наук СССР совместно с Ленинградским политехническим институтом и другими вузами) был соз-

дан телеуправляемый от ЭВМ подводный робот "Манта" с техническим зрением и с оцувствленным манипулятором, а в 1971 г. — следующий его вариант с техническим зрением и системой целеуказания на телевизионном экране (рис. 1.11).

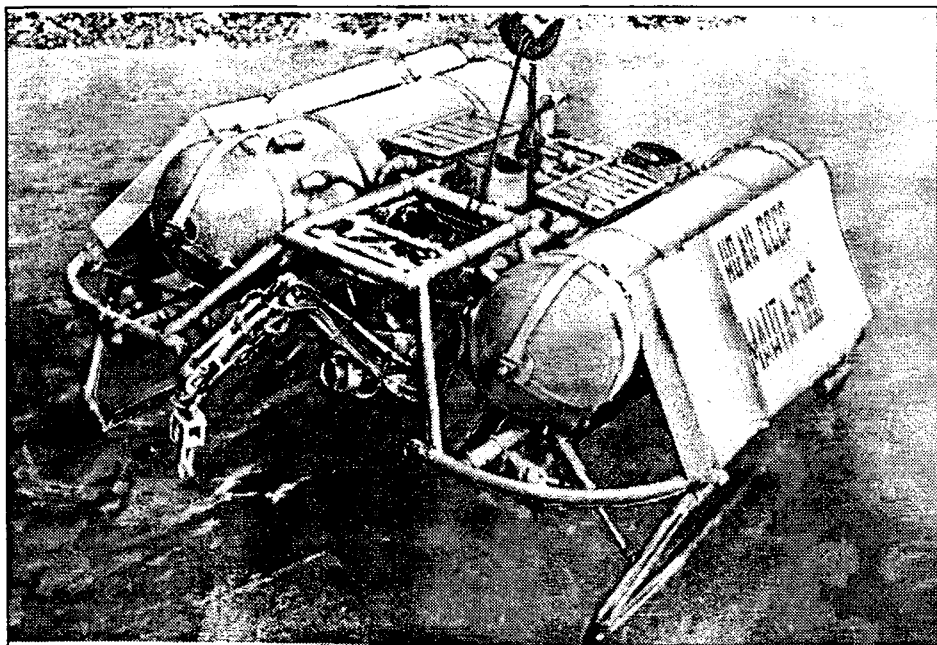


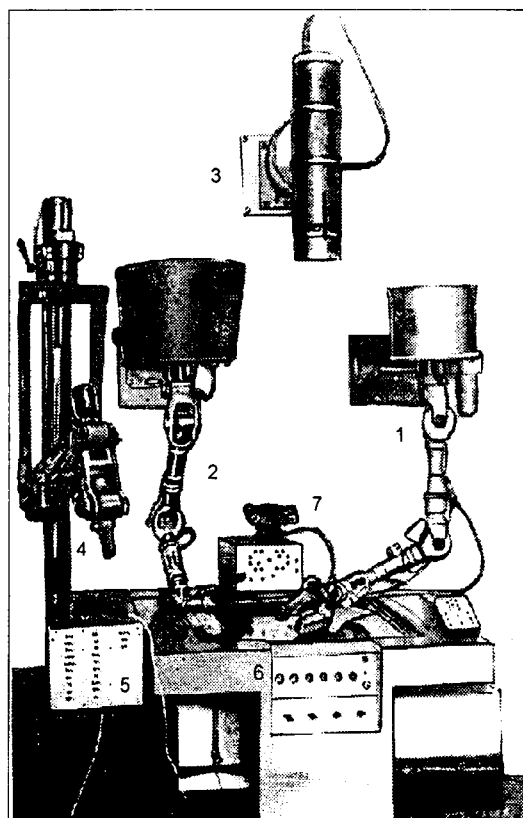
Рис. 1.11. Один из первых отечественных подводных роботов "Манта"

В 1971 г. в Ленинградском политехническом институте были созданы образцы интегральных роботов, снабженных развитой системой оцувствления, включая техническое зрение и речевое управление (рис. 1.12) [1]. В том же году в Ленинграде состоялся Первый Всесоюзный семинар, посвященный роботам, управляемым ЭВМ.

Первые промышленные образцы современных промышленных роботов с позиционным управлением были созданы в 1971 г. (УМ-1, "Универсал-50", УПК-1).

Начиная с 1972 г. работы в области робототехники приняли плановый характер в масштабе страны. В 1972 г. постановлением Госкомитета СССР по науке и технике была сформулирована проблема создания и применения роботов в машиностроении как государственно-важная и определены основные направления ее решения. В следующем году была утверждена первая программа работ, которая охватила основные отрасли промышленности и ведомства, включая Академию наук и высшую школу. В соответствии с этой про-

а)



б)

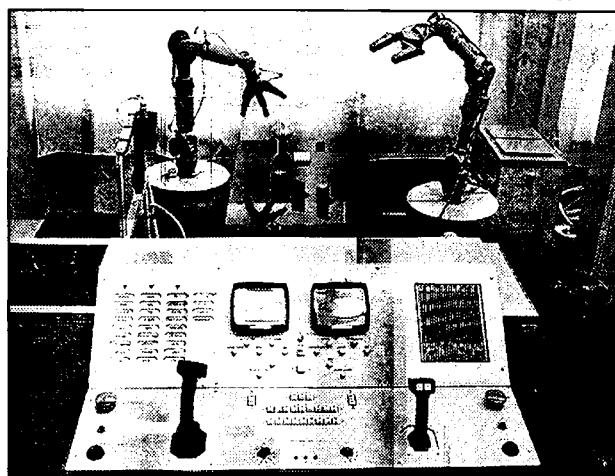


Рис. 1.12. Экспериментальные интегральные роботы (ЦНИИРТК, Россия): а — ЛПИ-2: 1, 2 — манипуляторы со съемными осязательными схватами; 3 — передающая телевизионная камера; 4 — задающая рукоятка; 5 — система речевого управления; 6 — осязательный двухкоординатный стол; 7 — ультразвуковой локатор; б — ЛПИ-3; на переднем плане пульт управления с двумя задающими ручками

граммой к 1975 г. были созданы первые 30 серийно пригодных промышленных роботов, в т. ч. универсальных (для обслуживания станков и прессов, для нанесения покрытий и точечной сварки) на пневмо-, гидро- и электроприводах, стационарных и подвижных.

В следующие годы эта работа была продолжена на основе новой пятилетней программы. Было создано более 100 марок промышленных роботов и организовано серийное производство 40 из них. Одновременно были начаты работы по унификации и стандартизации промышленных роботов по программе Госстандарта СССР.

Фундаментальные и поисковые работы в области робототехники были возвращены на основе программ Академии наук и высшей школы, которые были увязаны с комплексной программой Госкомитета СССР по науке и технике.

К концу 1980 г. парк промышленных роботов в стране превысил 6000 шт., что находилось, например, на уровне парка роботов США, и составлял более 20 % парка роботов в мире, а к 1985 г. превысил 40 тыс. шт., в несколько раз превзойдя парк роботов США и достигнув 40 % мирового парка.

Первые промышленные роботы второго поколения со средствами очувствления появились в отечественной промышленности на сборочных операциях в приборостроении с 1980 г. Первый промышленный робот с техническим зрением МП-8 был создан в 1982 г. [1].

В 1975 г. впервые был начат выпуск инженеров по робототехнике в Ленинградском политехническом институте, а в 1981 г. была введена новая специальность инженера-электромеханика "Робототехнические системы" и организована подготовка специалистов в ряде ведущих вузов страны.

С распадом СССР вся эта плановая работа по развитию отечественной робототехники на государственном уровне была прервана. Практически прекратилось производство роботов. Их парк сократился более чем на порядок одновременно с сокращением производства в стране в целом. В результате к 1995 г. разработки и применение роботов в России сузились до задач обеспечения невыполнимых без роботов работ в экстремальных ситуациях (стихийные бедствия, аварии, борьба с террористами и т. п.). Правда, в этой сфере отечественная робототехника не только не потеряла ранее достигнутого научно-технического уровня, но и продолжает развиваться, в том числе и благодаря участию в различных международных проектах и программах. На рубеже 2000 г. начали возрождаться отраслевые и ведомственные научно-технические программы по робототехнике и межотраслевые программы по отдельным особо государственно-важным ее аспектам, начал восстанавливаться парк роботов и в промышленности. Все это позволяет прогнозировать в ближайшее время возрождение отечественной робототехники и роботостроения в полном объеме по мере восстановления нашей экономики и народного хозяйства в целом. Пока в стране создаются центры иностранных фирм, поставляющих отечественным потребителям различные средства робототехники.

ГЛАВА 2

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯМИ ЧЕЛОВЕКА

2.1. Постановка задачи

С момента зарождения робототехники и до настоящего времени образцами для нее служат живые организмы и, прежде всего, человек. Создаваемые сегодня роботы хотя во многом и превосходят живую природу, но все еще очень далеки по ряду таких важнейших свойств, как обработка информации, управляемость и, конечно, по интеллектуальным возможностям человека. Поэтому живая природа для робототехники еще долго будет служить источником идей и образцом для заимствования.

Кроме того, существует серьезная проблема создания технических средств, заменяющих отдельные части организма человека, — проблема протезирования. Наконец, средства робототехники в ряде применений должны действовать в органическом единстве с человеком. В связи с этим требуется знать, как организованы движения в живой природе и как они управляются.

Человек совершает во внешней среде два вида движений — *манипуляции* и *локомоции*. Манипуляция (от французского слова *manus* — рука) — это движение рук при выполнении какой-либо работы. Локомоция (от латинских слов *locus* — место и *motio* — движение) — движение всего тела для осуществления перемещения во внешней среде. Человек выполняет его с помощью ног, но иногда использует и руки (ползание, лазанье, плавание).

2.2. Общая схема управления движением человека

На рис. 2.1 показана обобщенная функциональная схема систем управления движениями тела человека, в которые входят пассивная часть — скелет, ее

активная (движущая) часть — мышцы, чувствительные устройства — рецепторы и информационно-управляющая система — центральная нервная система (ЦНС). Скелет (его часть, которая участвует в движении) является вместе с мышцами объектом управления в виде подвижно соединенных костных звеньев, образующих с позиций механики многозвенные кинематические цепи, подобные имитирующим их манипуляторам роботов. Управление этим объектом осуществляет ЦНС на основе информации, получаемой от рецепторов.

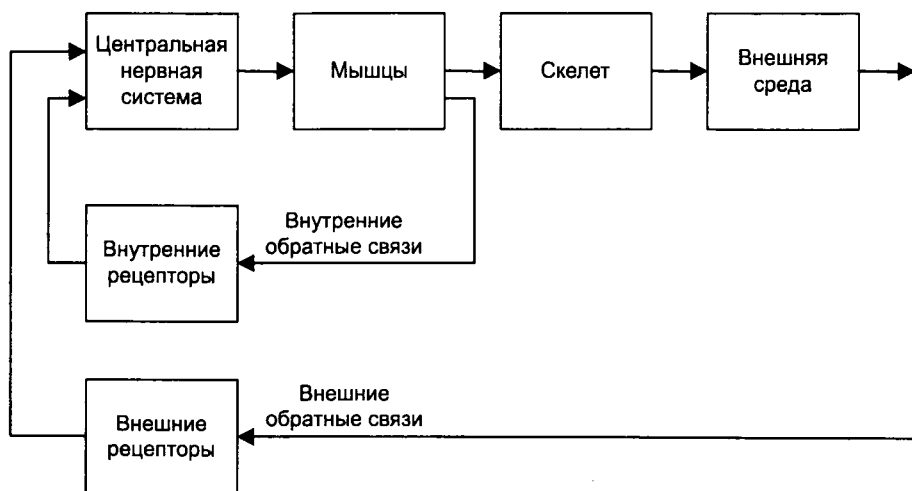


Рис. 2.1. Функциональная схема системы управления движениями человека

Назначение этой системы управления — поддержание позы, ориентация (во внешней среде), перемещение тела в пространстве — локомоции и, наконец, манипуляции. Рассмотрим ее составные части.

Нейроны. Это нервные клетки, являющиеся "элементной базой" рассматриваемых систем. Существует много типов нейронов, специализирующихся на восприятии внешней информации, ее преобразовании, хранении, передаче и, наконец, воздействии на мышцы. В организме человека — миллиарды нейронов, которые объединены в нейронную сеть, охватывающую все тело.

На рис. 2.2 изображен нейрон. Он имеет несколько входов, на которые поступают сигналы от других нейронов через отростки их тела — *дендриты*, и один разветвленный выход — *аксон*. Его соединения с дендритами других нейронов осуществляются через утолщения — *синапсы*.

Сигналы на входе и выходе — электрические импульсы. Интенсивность сигналов определяется частотой следования и величиной импульсов. Сигналы могут быть возбуждающими или тормозящими. Выходной сигнал является

нелинейной функцией суммы входных сигналов, которые алгебраически складываются с различными весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты могут быть заданы генетически или устанавливаться в процессе функционирования под воздействием других нейронов. При превышении суммарным входным сигналом порога нечувствительности нейрона последний возбуждается и генерирует выходной импульс, который распространяется по аксону.

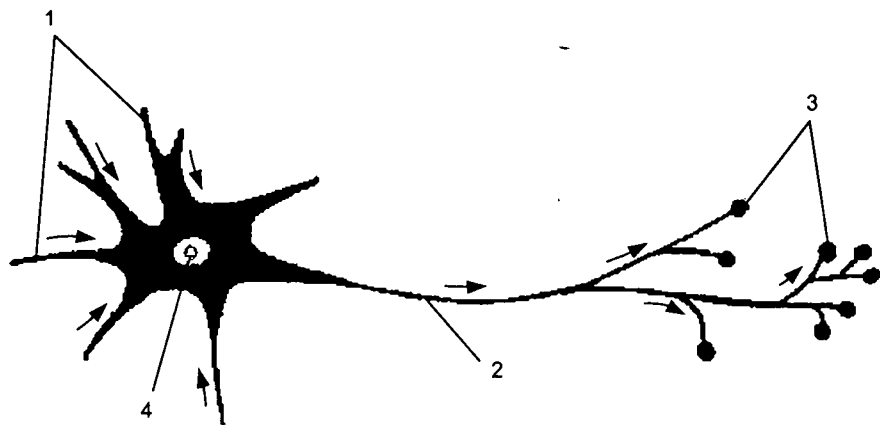


Рис. 2.2. Строение нейрона: 1 — дендриты; 2 — аксон; 3 — синапсы; 4 — сома (тело клетки)

В местах соединения аксона с дендритами других нейронов — синапсах — происходит химический процесс преобразования выходного импульса во входные импульсы для этих нейронов. Кроме таких связей аксон-дендрит, в нейронной структуре существуют еще связи аксон-аксон и дендрит-дендрит. Это существенно увеличивает возможности обработки информации, т. к. количество синапсов на порядок больше числа нейронов.

Длина аксонов отдельных нейронов соизмерима с размерами тела человека (например, аксоны идут от спинного мозга до пальцев ног). Один нейрон может иметь тысячи входов от других нейронов и сотни разветвлений выхода через синапсы. Возбуждение по аксону передается в виде импульсов величиной в десятки милливольт и длительностью примерно 1 мс со скоростью 50—100 м/с. После каждого возбуждения нейрону требуется определенное время для возвращения в исходное состояние. Это так называемый *рефракторный период*. Аксоны нейронов объединяются в пучки, образуя стволы или нервы.

На рис. 2.3 показана обобщенная схема нейронной системы управления движением. Она обрабатывает информацию, получаемую от "органов чувств" (сенсорных систем), формирует модель внешней среды, обеспечивая ее соответствие текущей ситуации, вырабатывает адекватные решения (реакции) в виде заданий на определенные действия и контролирует их выполнение.

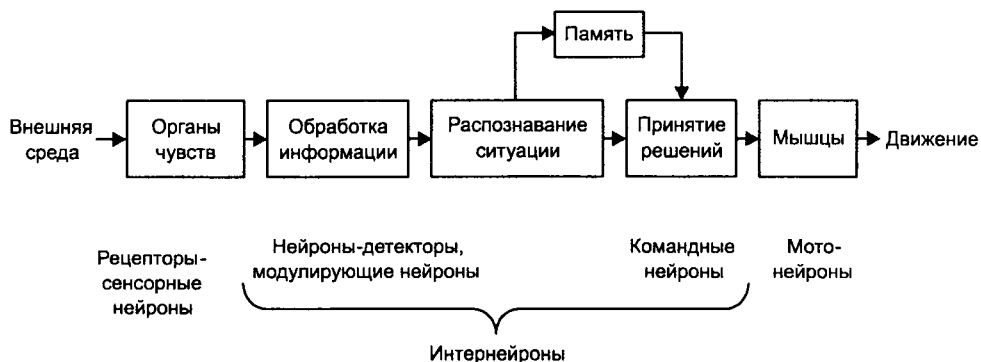


Рис. 2.3. Функциональная схема нейронной системы управления движениями

Нейронная система состоит из последовательных слоев нейронов, которые реализуют уровни обработки информации. В *рецепторах* органов чувств осуществляется параллельная первичная обработка входной информации слоями сенсорных нейронов. Между рецепторами и *мотонейронами*, которые приводят в действие мышцы, находятся слои *интернейронов* (отсюда их название). Они включают слои *нейронов-детекторов* и *командных нейронов*. Между ними находятся еще *модулирующие нейроны*. Нейроны-детекторы послойно последовательно выявляют отдельные объекты, события, а затем по их сочетанию распознают ситуацию в целом. (Например, при распознавании букв вначале выделяются их отдельные части, а затем по сочетанию последних определяются сами буквы.)

Модулирующие нейроны устанавливают интенсивность реакции на внешнюю ситуацию. Она осуществляется воздействием синапсов этих нейронов на синапсы нейронов-детекторов и задается верхними уровнями нейронной структуры, ответственными за общее функционирование организма и формирование основных стимулов поведения (оборонительные, пищевые и т. д.).

Командные нейроны задают через мотонейроны конкретную двигательную реакцию на текущую ситуацию, определенную нейронами-детекторами. Она реализуется в результате возбуждения, передаваемого от соответствующей комбинации возбужденных нейронов-детекторов определенной совокупности командных нейронов, ответственных за эту реакцию. Совокупность возбужденных мотонейронов обеспечивает целостную поведенческую реакцию, адекватную выявленной ситуации. Командные нейроны образуют моторную кору головного мозга, которая охватывает все множество реакций организма на различные возможные ситуации.

Память, показанная на рис. 2.3, представляет собой нейронные слои, повторяющие слои нейронов-детекторов. Это память оперативная, наряду с ней существует постоянная память, в том числе и генетическая синаптическая.

Извлечение информации из памяти — ассоциативное и связано с внешними ситуациями и реакциями на них.

В целом, топологически нейронные слои, начиная со слоев рецепторных нейронов и вплоть до командных нейронов моторной коры, образуют сужающиеся колонки — "информационные единицы", каждая из которых ориентирована на совместное функционирование в конкретной ситуации.

Мышцы. Тело человека приводится в движение с помощью поперечно-полосатых мышц. Их основу составляет так называемый *анизотропный элемент* — диск в виде круглой пластинки размером с красное кровяное тельце. Под действием управляющего сигнала этот элемент резко сокращается (в течение примерно 1 мс). После этого для возврата в исходное состояние ему требуется вдвое-втрое большее время. Таким образом, он представляет собой импульсный элемент с существенным мертвым временем.

Для создания длительного непрерывного изменения усилия соединенные в цепочку анизотропные элементы перемежаются *изотропными элементами* из упругой сухожильной ткани. Эти изотропные элементы играют роль амортизаторов, быстро растягиваясь при импульсном сжатии анизотропных элементов, а затем плавно возвращаясь в исходное состояние. Цепочки анизотропных и изотропных элементов образуют *волокна*.

В зависимости от быстродействия и развиваемого усилия различают три группы волокон:

- ☐ быстро сокращающиеся и развивающие большое усилие, но быстро утомляющиеся волокна;
- ☐ быстро сокращающиеся, но развивающие меньшее усилие, зато более выносливые волокна;
- ☐ медленно сокращающиеся и развивающие небольшое усилие, но наиболее выносливые волокна.

Из волокон, объединенных в пучки по 10—15 в каждом, и состоит мышца. В одном пучке могут находиться волокна разных типов. Время сокращения волокон лежит в пределах 10—200 мс, а развиваемое ими усилие — от 1 до 1000 Н.

Управление мышцей осуществляется специальными двигательными нейронами — мотонейронами. Каждому мотонейрону подчинены волокна одного типа, которые распределены по разным пучкам мышцы. Для этого к каждому пучку подходит отдельный аксон этого мотонейрона, и его синапсы расположены на входящих в этот пучок волокнах данного типа. Объединенные таким образом по управлению однотипные волокна, принадлежащие одному пучку, называют *двигательной единицей*. В каждую двигательную единицу входит от нескольких единиц до тысяч однотипных волокон.

Управление мышцей осуществляется сериями импульсов, поступающих от мотонейронов и следующих с частотой 50—200 импульсов в секунду. В зависимости от количественного соотношения входящих в мышцу волокон разных типов образуются соответственно мышцы различного типа — от быстрых до медленнодействующих, но более выносливых.

Таким образом, в целом, поперечно-полосатую мышцу можно представить как сложного состава двигатель, состоящий из большого числа (до нескольких тысяч) параллельно включенных элементарных импульсных двигателей — волокон, "конструктивно" объединенных в пучки, а по управлению — в двигательные единицы разного типа. Требуемое изменение во времени мышечного усилия обеспечивается при этом путем последовательного включения в определенные моменты времени различного числа двигательных единиц разных типов.

Мышца — это двигатель одностороннего (нереверсивного) действия, т. е. при поступлении сигнала она может только сокращаться, создавая усилие в одном направлении. Поэтому мышцы крепятся к костям по балансной схеме, образуя пары противоположно действующих *мышц-антагонистов* (рис. 2.4). Когда одна из этих мышц, сокращаясь, осуществляет относительное перемещение костей в одном направлении, другая мышца растягивается, подготавливаясь к выполнению движения в противоположном направлении.

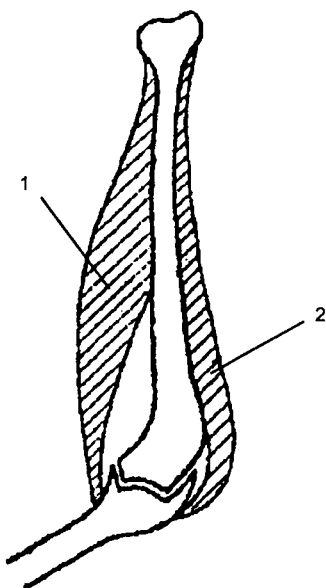


Рис. 2.4. Крепление мышц-антагонистов: 1 — мышца-сгибатель; 2 — мышца-разгибатель

Рецепторы. Это чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в зависимости от источников воспринимаемой ими информации. Основой их служат белковые молекулы. Под действием внешнего раздражителя они генерируют электрический потенциал, который преобразуется в электрические импульсы определенной частоты. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Внешние рецепторы человека — это, прежде всего, 5 основных органов чувств — зрение, слух, осязание, обоняние, вкус, вестибулярный аппарат (в височной кости), который определяет положение тела в пространстве и ускорение, а также множество рецепторов, расположенных в коже, — температурные, давления, болевые. У некоторых живых организмов имеются также рецепторы, чувствительные к магнитному и электрическому полям Земли.

Внутренние рецепторы (интеррецепторы), которые связаны с управлением движениями, выдают информацию о состоянии двигательного аппарата. Они делятся на мышечные рецепторы растяжения, сухожильные и механорецепторы суставов и кожи. Мышечные рецепторы размещены в мышце и дают информацию о длине мышцы и скорости ее изменения, сухожильные — об усилии и скорости его изменения, суставные — о величине суставного угла, скорости и ускорении его изменения.

Центральная нервная система. Отделы центральной нервной системы показаны на рис. 2.5, а соответствующая ей структурная схема дана на рис. 2.6. Если некоторые части мозга имеют достаточно четкие границы, например, мозжечок, то другие постепенно переходят друг в друга.

Передний мозг состоит из конечного мозга и промежуточного мозга. В конечный мозг входит кора в виде двух полушарий — левое и правое, включающие "новую кору", которая у человека превосходит всю остальную часть мозга и имеет толщину в 60—100 нейронов. Для того чтобы по мере своего развития она разместилась в черепе, в ней образовались складки (борозды). Полушария соединены мозолистым телом и нервными путями. В каждом полушарии различают 4 доли: лобную, височную, теменную и затылочную. В коре имеется сенсомоторная область, которая состоит из связанных сенсорных областей (соматосенсорной, получающей информацию от внутренних рецепторов; зрительной; слуховой; обонятельной) и моторной области.

Входящая в конечный мозг лимбическая система объединяет информацию от отдельных органов чувств и играет важную роль в поведении, направленном на выживание (питание, чувство опасности, размножение). Находится лимбическая система под большими полушариями перед стволom мозга, как и промежуточный мозг, через который передаются ее сигналы.

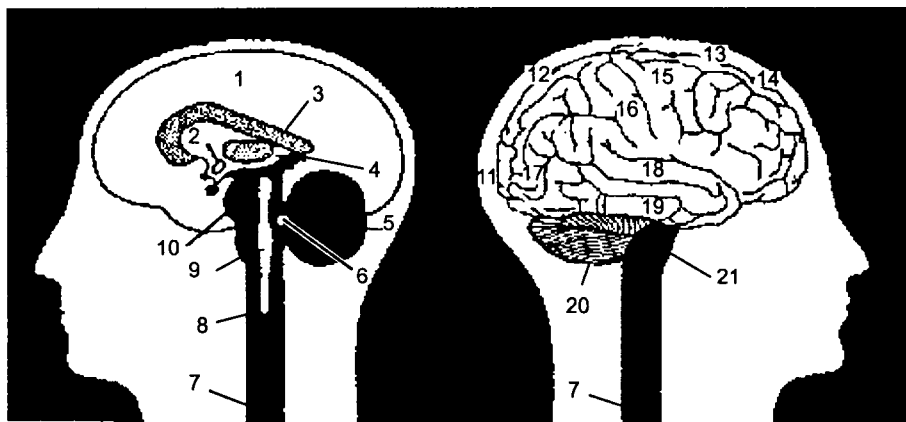


Рис. 2.5. Устройство центральной нервной системы: 1 — новая кора; 2 — гипоталамус; 3 — мозолистое тело; 4 — таламус; 5 — мозжечок; 6 — вестибулярные ядра; 7 — спинной мозг; 8 — продолговатый мозг; 9 — ретикулярная формация; 10 — варолиев мост; 11 — затылочная доля; 12 — теменная доля; 13 — центральная борозда; 14 — лобная доля; 15 — двигательная кора; 16 — соматосенсорная кора; 17 — зрительная кора; 18 — слуховая кора; 19 — обонятельная кора; 20 — мозжечок; 21 — ствол мозга

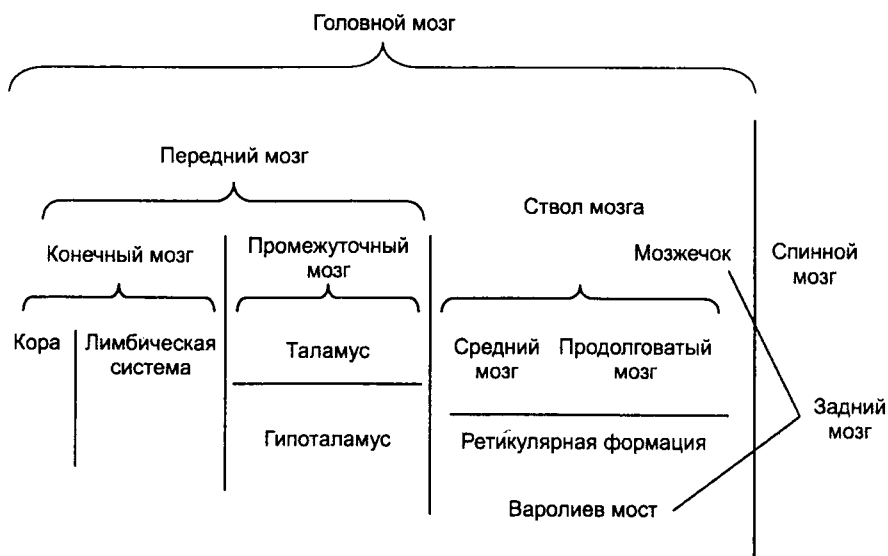


Рис. 2.6. Структурная схема центральной нервной системы

Промежуточный мозг включает таламус и гипоталамус. В таламусе осуществляется промежуточная обработка идущей к коре сенсорной информации (кроме обонятельной, которая обрабатывается в гипоталамусе) и части идущей "вниз" моторной информации. Гипоталамус вместе с лимбической сис-

темой определяет эмоциональное и мотивационное поведение. (Кроме того, здесь контролируются биохимические процессы — солевой обмен, кровяное давление, дыхание, температура, водный баланс, чувства голода и насыщения, работа эндокринной системы.)

Ствол мозга управляет зрительными, слуховыми и двигательными рефлексами. Через него проходят вверх и вниз пути, связанные с рефлекторной и двигательной деятельностью.

Ретикулярная формация ствола мозга, которая, вероятно, была когда-то высшим уровнем нервной регуляции, ответственна за выбор типа поведения (бежать от опасности или нападать и т. п.), регулирует чередование сна и бодрствования, обеспечивает устойчивость позы в поле силы тяжести.

Мозжечок вместе с варолиевым мостом образуют задний мозг. Через них проходят информационные пути вверх и вниз. Кроме того, мозжечок обеспечивает координацию движений, поддерживает тонус и регуляцию мышц.

Продолговатый мозг является продолжением спинного мозга в черепе. Через него из спинного мозга вверх идет информация о положении частей тела и мышечном тонусе, а вниз — двигательные сигналы. (Кроме того, продолговатый мозг участвует в регуляции сердечно-сосудистой системы, дыхания, пищеварения, равновесия.)

Спинной мозг расположен в позвоночнике и разделен на сегменты, которые управляют отдельными частями тела. Для этого в каждом сегменте имеются рецепторные нервные клетки и управляющие мышцами мотонейроны. Сегменты соединены нервными волокнами, которые идут вверх и вниз вдоль спинного мозга.

Прежде чем перейти к обсуждению взаимодействия частей мозга, рассмотрим, как осуществляется обработка информации от внешних рецепторов на примере зрительной и слуховой информации.

В глазах человека находятся фоторецепторы и в двух нейронных слоях выполняется предварительная обработка получаемой от них видеoinформации. В головном мозгу осуществляются три этапа последующей обработки зрительной информации, каждый реализуется в среднем в шести нейронных слоях — в подкорковой структуре, в первичной зрительной коре и в так называемой широкой зрительной сфере. В сетчатке глаза содержатся два типа фоторецепторов — палочки и колбочки. Палочки в сотни раз чувствительнее к свету, чем колбочки, но зато последние чувствительны к цвету. Их три типа — чувствительные к синему, зеленому и красному участкам спектра электромагнитного излучения. Всего в сетчатке более 100 млн палочек и 6—7 млн колбочек. Распределены они по сетчатке неравномерно. В центре сетчатки расположены предельно плотно колбочки, а по мере удаления от цен-

тра число колбочек уменьшается и на периферии сетчатки остаются только палочки. Поэтому боковое зрение не различает цветов, но зато много чувствительнее центрального.

Как ранее отмечено, первоначальная обработка и обобщения информации, выдаваемой фоторецепторами, осуществляется двумя слоями нейронов, расположенными в глазу. В результате происходит сжатие первичной информации более чем на два порядка: ~ 125 млн сигналов от фоторецепторов преобразуется в ~ 1 млн сигналов, поступающих в такое же количество волокон выходящего из глаза зрительного нерва, идущего в головной мозг.

Глаза человека находятся в постоянном движении, осуществляя обзорное сканирование поля зрения, что необходимо в связи с узкой зоной максимальной остроты зрения.

Видеоинформация в виде пачек частотно-модулированных импульсов поступает с каждого глаза через свой зрительный нерв в многослойные *подкорковые структуры* зрительной системы. Эта часть зрительной системы — наиболее древняя в головном мозгу. У земноводных и рыб она является верхним уровнем, обеспечивая их рефлекторное поведение. У позвоночных и особенно у человека основные функции зрительной системы по мере их развития переместились в активно развившуюся корковую структуру с образованием зрительной коры полушарий головного мозга. При этом в зрительную кору правого полушария поступает информация от зрительного поля левого глаза за исключением части этого поля с края сетчатки со стороны виска. Вместо нее такая же информация поступает от своего глаза. В зрительную кору левого полушария, наоборот, поступает такая информация от правого глаза и частично от левого. Причина такой перекрестной передачи информации от глаз в мозг все еще остается загадкой. Разумеется, в конечном итоге вся видеоинформация попадает в оба полушария за счет их связи. (Заметим попутно, что такое же перекрестное соединение существует и у двигательных путей: левое полушарие управляет правой рукой, а правое — левой.)

Несмотря на многократную обработку этой информации, она сохраняет топологическую привязку к первичному видеоизображению, фиксируемому фоторецепторами сетчатки хотя и с существенными масштабными искажениями. Последнее, прежде всего, относится к информации от центральной области сетчатки. В зрительной коре мозга она занимает больше места за счет сужения периферийной части. Такая топологическая инвариантность сохраняется на всех нейронных слоях зрительной системы. В результате эта система представляет собой совокупность колонок, пронизывающих все эти слои вплоть до зрительной коры, в каждой из которых осуществляется обработка информации от определенного участка зрительного поля, все более обобщаясь от слоя к слою. (При этом осуществляется и вертикальный разворот на

180° видеокартинки на сетчатке глаза для компенсации такого поворота, совершаемого хрусталиком.)

Функции подкорковых структур зрительной системы человека, как они сформировались еще в ходе эволюционного развития животных, заключаются в опознании отдельных объектов внешней среды — их формы, цвета, взаимного расположения, движения, т. е. всего того, что прежде всего было необходимо в ходе этого развития.

Второй этап обработки зрительной информации в головном мозгу осуществляется в первичной зрительной коре. Она содержит шесть нейронных слоев, через которые проходят упомянутые ранее колонки сечением $\sim 1\text{--}2\text{ мм}^2$, послойно обрабатывающие информацию с определенных участков зрительного поля, выявляя отрезки прямых линий с оценкой их длины и углового положения, дуги разной крутизны, крестообразные участки и т. п. Это выполняют специальные *нейроны-детекторы*, которые возбуждаются, когда такие особенности появляются на участке зрительного поля, контролируемом колонкой с таким нейроном-детектором. Дальнейшая обработка этой информации, включая распознавание целостных объектов внешней среды, является функцией других структур головного мозга, которые получили название *широкая зрительная сфера*. В правом полушарии она использует образные представления, а в левом — вербальные.

Общий принцип распознавания объектов для обоих полушарий один — это выделение отдельных фрагментов, определение их признаков, распознавание этих признаков и затем по их совокупности распознавание уже объекта в целом. Однако этот процесс происходит по-разному в полушариях мозга в соответствии с разным видом информации, которым они оперируют. В правом полушарии, в отличие от левого, выявляемые фрагменты могут не иметь словесного эквивалента и вообще самостоятельного значения, как, например, черты лица человека. Поэтому правое полушарие, оперируя зрительными образами, обеспечивает наиболее быстрое узнавание объектов типа лиц людей, обобщение зрительных образов и их классификацию по форме и т. п.

Левое полушарие, оперируя вербальными понятиями, являющимися самым широким обобщением образной информации, в отличие от правого полушария, тяготеет к фрагментарности в ущерб целостному рассмотрению и составляет базу абстрактного мышления человека понятиями.

Как следует из изложенного, необходимым дополнением зрительной системы для обеспечения распознавания образов является память, хранящая прототипы и эталоны этих образов и их фрагментов. Это ассоциативная память образная в правом полушарии и вербальная (на внутреннем языке) в левом. Распознаванию предшествует процесс обучения, который продолжается всю жизнь по мере ознакомления с новыми объектами и явлениями. В результате память заполняется все новыми сведениями о внешнем мире.

Последняя функция зрительной системы человека — это определение *дальности* и связанное с этим трехмерное представление внешней среды. Основным способом определения дальности заключается в оценке видимых размеров объектов известных по величине.

Аналогично устроена слуховая система. Она включает два уха (с улиткой с чувствительными волосковыми клетками во внутреннем ухе), слуховой нерв, который идет к слуховой области коры с промежуточным преобразованием информации. Одновременно на втором более древнем пути информация от обоих ушей объединяется для определения направления источника звука.

С учетом изложенного на рис. 2.7 более подробно представлена структура системы управления движениями человека, показанная на рис. 2.1, с выделением отдельных частей центральной нервной системы. Показаны три основных контура управления, которые будут рассмотрены далее:

- управление мышцами на основе внутренних обратных связей от внутренних рецепторов;

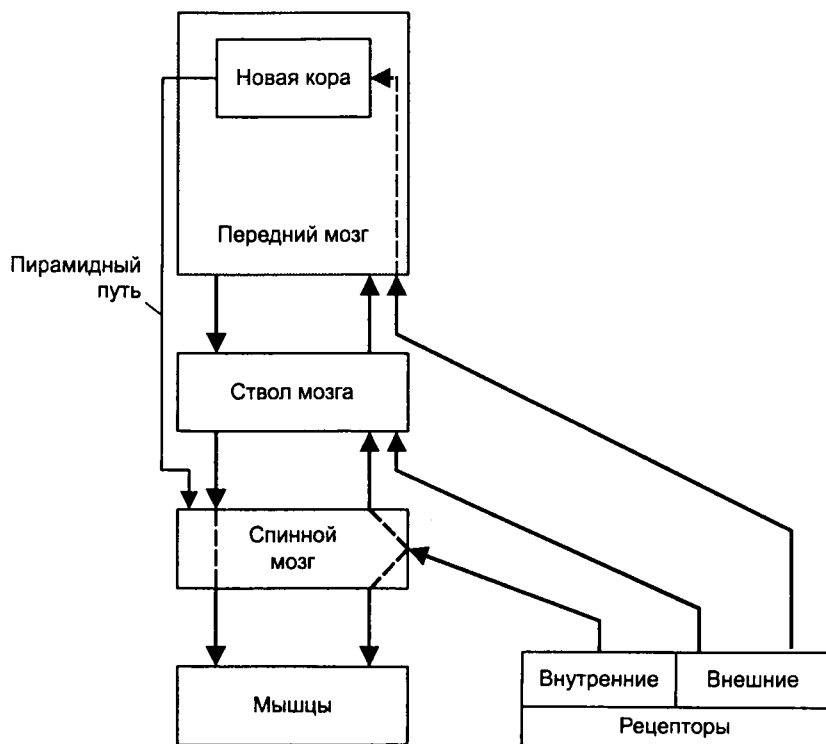


Рис. 2.7. Многоконтурная структура системы управления движениями человека

- ☐ экстрапирамидный путь управления;
- ☐ пирамидный (новый) путь (тонкая линия).

2.3. Динамические уровни управления движением

На рис. 2.8 показана общая функциональная схема управления движениями человека. Система является иерархической, и в ней можно выделить следующие 5 уровней управления:

- ☐ стратегический уровень принятия решений о выполнении определенных действий на основе мотиваций;
- ☐ тактический уровень планирования этих движений;
- ☐ три динамических уровня исполнения движений путем непосредственного управления мышцами.

Начнем рассмотрение этих уровней снизу, с динамических уровней. Два нижних уровня — это управление по жестким (врожденным) программам, т. е. это уровни рефлекторного управления. Это управление осуществляется через спинной мозг, но в нем участвует и головной мозг — нижние отделы мозжечка (обеспечение тонуса мышц и позы) и передний мозг (связанное программное управление).

Рефлекторное управление отдельным суставом. Этот нижний уровень динамического управления включает подуровни управления отдельными мышцами и с их помощью суставами. Контур управления отдельной мышцей замыкается на сегмент спинного мозга, которому подчинен сегмент тела, включающий эту мышцу, состоит из трех частей — слоя мотонейронов, управляющих мышцей, сенсорного слоя, связанного с внутренними рецепторами мышцы и сухожилий, и расположенного между ними слоя, осуществляющего обработку информации и запоминание готовых программ реакций на определенные воздействия. В простейшем случае эти промежуточные слои могут отсутствовать и тогда мотонейроны замыкаются прямо на рецепторы.

Совокупность двух таких систем управления мышцами-антагонистами обеспечивает управление отдельным суставом. При этом контуры управления мышцами перекрестно связаны друг с другом сигналами позиционной обратной связи по длине мышцы: сигналы от рецепторов сокращаемой мышцы, помимо воздействия по цепи обратной связи на мотонейроны своей мышцы, одновременно воздействуют с обратным знаком на мотонейроны мышцы-антагониста, снижая ее возбуждение и тем самым уменьшая противодействие сокращающейся мышце. При подходе к заданному положению сустава,

1557208

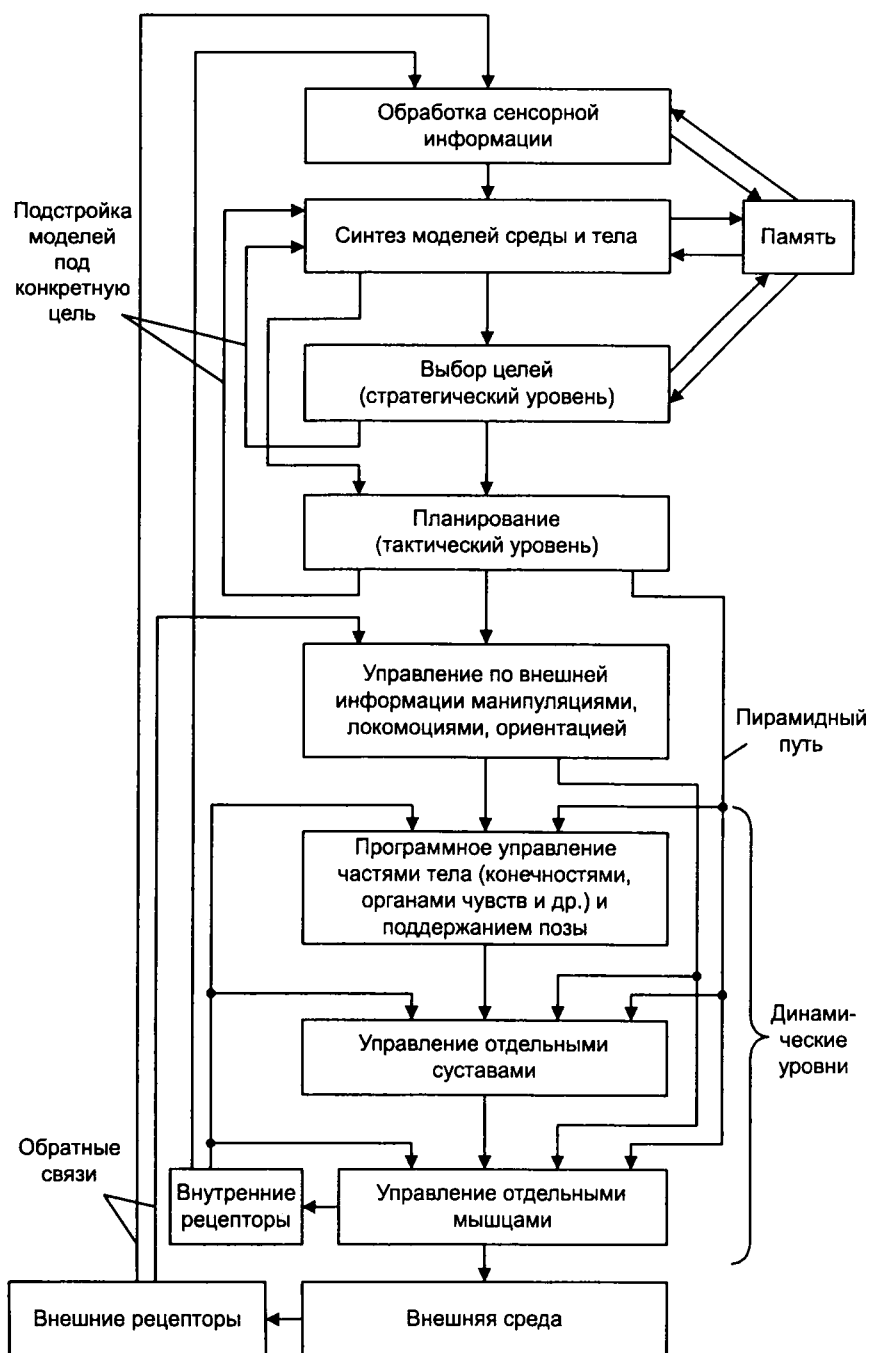


Рис. 2.8. Общая функциональная схема системы управления движениями человека

когда необходимо осуществить торможение, мышцы меняются ролями и на мышцу-антагонист подается сигнал, вызывающий ее сокращение.

На рис. 2.9 показана функциональная схема системы управления суставом.

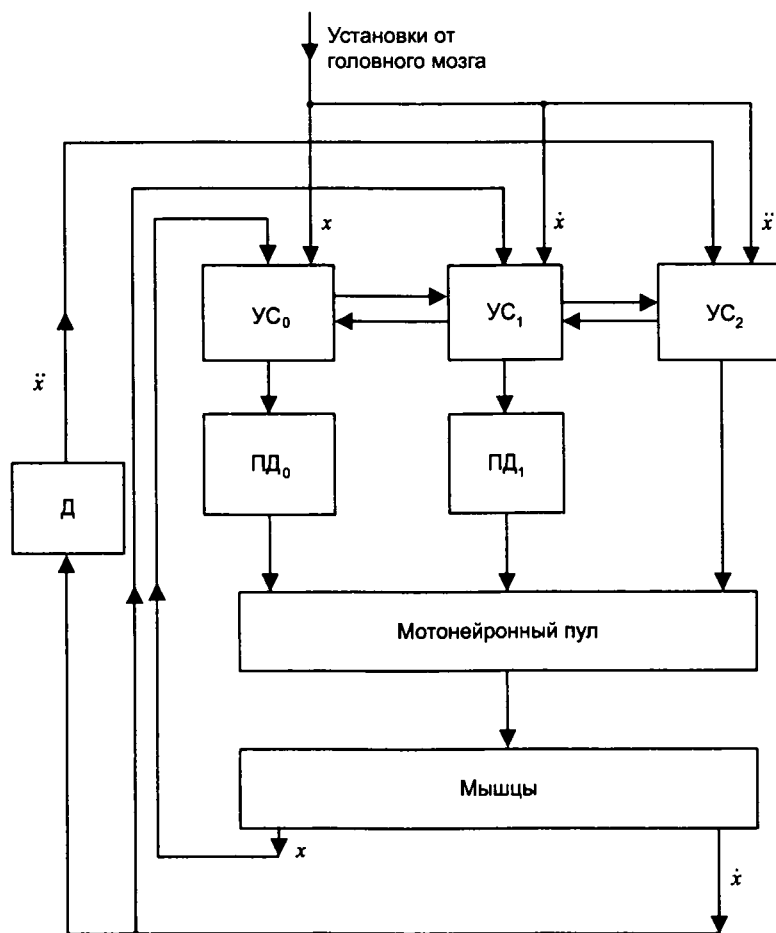


Рис. 2.9. Функциональная схема системы управления суставом: $УС_0$, $УС_1$, $УС_2$ — устройства сравнения; $ПД_0$, $ПД_1$ — пропорционально-дифференцирующие звенья; $Д$ — дифференцирующее звено

Рефлекторное связанное управление несколькими звеньями конечностей тела. Это второй динамический уровень управления, который обеспечивает совместное целенаправленное движение суставов одной или нескольких конечностей без использования сенсорной информации о внешней среде, т. е. тоже в виде рефлекторного управления, как и управление отдельным суставом.

Связанное управление двумя конечностями осуществляется путем управления определенными суставами этих конечностей одним сегментом спинного мозга (внутрисегментарный рефлекс). Помимо сегментов спинного мозга на этом уровне в управлении участвуют наиболее древние области переднего мозга, в которых на основании информации, получаемой от внутренних рецепторов, формируется общая картина положения всех частей тела и вырабатывается двигательная реакция, которая передается в спинной мозг.

Этот уровень управления, в основном исполнительный, отрабатывает команды вышестоящих уровней. Однако имеются определенные типы движений, для которых этот уровень является самым верхним. Это прежде всего различные ритмичные движения, не требующие оперативной информации о внешней среде, а также поддержание позы и обеспечение мышечного тонуса. В последних случаях в управлении участвуют еще и нижние отделы мозжечка.

Управление с использованием внешней информации. Если первые два уровня осуществляют программное управление, то этот третий уровень реализует адаптивное управление с использованием информации от внешних рецепторов. В этом уровне участвуют все отделы головного мозга. Реализуется он двумя параллельными путями: через второй уровень управления и непосредственным воздействием со стороны коры больших полушарий (ее двигательной зоны) на сегменты спинного мозга.

Первый путь — это показанный на рис. 2.7 древний экстрапирамидный путь управления более сложными движениями, которые постепенно осваивались живыми организмами в процессе эволюции и для реализации которых требовалось привлекать все более сложную сенсорную информацию. На основе последней на этом уровне вырабатываются задания для второго уровня, затем они оперативно корректируются в ходе реализации.

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

В целом рассмотренный третий уровень управления ответствен за ориентацию во внешнем пространстве тела и органов чувств локомоции и манипуляции, а также за выполнение таких сложных движений, как, например, упражнения на гимнастических снарядах, метание предметов, жонглирование ими, копирующие движения (срисовывание и т. п.).

Примером ориентационных движений являются также движения глаз при слежении за объектами внешней среды с учетом таких возмущений, как относительное перемещение этих объектов, изменение положения головы, изменение параметров объектов (яркости, контрастности и т. п.). Эти движения

осуществляются глазодвигательной системой, которая содержит 3 пары мышц-антагонистов.

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

Манипуляционные движения больше всего зависят от внешних рецепторов и мотиваций. В коре больших полушарий головного мозга имеются области (сенсомоторная кора), за которыми закреплены определенные сегменты тела, и они осуществляют управление мышцами этих сегментов на основе получаемой внешней и внутренней информации. (Площадь этих областей тем больше, чем сложнее задача управления соответствующим сегментом тела.)

В целом все рассмотренные динамические уровни управления движением, действуя совместно, реализуют требуемые движения в виде комбинации следующих трех составляющих:

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

Последний вариант управления требует максимального участия головного мозга и используется только в тех случаях, когда требуемое движение не удастся свести к рефлекторным. Кроме того, в случае необходимости он резервирует предыдущие варианты, а также участвует наряду с экстрапирамидным путем в отработке новых программ (формировании новых рефлекторных дуг). Такой процесс обучения можно представить следующим образом. Вначале требуемое новое движение многократно осуществляется путем управления мышцами непосредственно высшими двигательными центрами. Одновременно запоминаются и усредняются синтезированные при этом управляющие воздействия на отдельные мышцы. В результате формируется готовая двигательная реакция на задание сверху, а верхние уровни освобождаются от управления отдельными мышцами, передавая эту функцию нижним уровням. Эти вновь приобретенные в ходе обучения программы хранятся и реализуются третьим уровнем управления.

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

Управление мышцами непосредственно сверху позволяет не только получать лучшее качество движений, но и осуществлять принципиально новые типы сложных движений, не реализуемых с помощью экстрапирамидного пути, на котором этому препятствует набор врожденных и приобретенных стереотипных программных движений. Именно поэтому при освоении новых движений на производстве и в спорте часто главной проблемой становится преодоление ранее сложившихся рефлекторных движений [2].

2.4. **Тактический уровень управления движением**

Как следует из схемы на рис. 2.8, на этом уровне составляется план достижения той очередной цели, которая задается вышестоящим стратегическим уровнем управления. Отсюда этот план в виде конкретного алгоритма движений с выделением тактических подцелей и последовательности их достижения спускается для реализации на динамические уровни. Со стороны тактического уровня осуществляются непрерывный контроль и в случае необходимости оперативная корректировка заданных алгоритмов при изменении реальной ситуации. Реализуется этот уровень корой больших полушарий головного мозга (ее ассоциативными областями), т. е. в полной мере он свойствен лишь человеку и только у высших животных существует в зачаточном состоянии.

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

Тактический уровень — это высший уровень управления для подобных целенаправленных движений, реализующий их путем разбиения на более простые движения, которые затем уже "бездумно" исполняются нижними исполнительными уровнями. В зависимости от того, какая при этом необходима информация, управляющие воздействия с тактического уровня поступают на различные нижние уровни. Например, движения хирурга, для реализации ко-

торых требуется зрительная информация, осуществляются через третий уровень динамического управления, вязание спицами, где необходима только внутренняя информация, — через второй уровень, а письмо — в значительной степени прямо через первый уровень.

Для выбора тактики достижения заданной сверху цели и составления соответствующего плана действий необходимо знать внешнюю обстановку и состояние организма. Этому служат модели внешней среды и тела, которые формируются и непрерывно корректируются на основе получаемой сенсорной информации. При этом для каждой конкретной цели эти модели преобразуются, ориентируясь на эту цель, путем выделения наиболее существенных для ее достижения особенностей и деталей.

Используемая на этом уровне информация перерабатывается таким образом, что содержит уже не количественные, а обобщенные качественные характеристики объектов, т. е. здесь применяется не метрика предметов и действий с ними, а их топология и понятия (буква, стул и т. п.).

Ранее было описано, как происходят отображение и последовательное преобразование зрительной и другой сенсорной информации слоями нейронов с целью выделения наиболее существенных для данной задачи объектов и их признаков. Эти многослойные отображения и являются моделями среды и тела. В слоях ассоциативных областей коры производятся преобразования этих моделей с переходом от непосредственных чувственных образов к более абстрактным. В ходе составления тактического плана достижения поставленной конкретной цели его варианты "проигрываются" на моделях среды и тела, а после выбора окончательного плана составляется прогнозируемая модель будущего состояния среды и тела. Когда в процессе выполнения плана возникают расхождения с прогнозом, на тактическом уровне осуществляется оперативная корректировка плана.

Как ранее было отмечено, уровень тактического управления ответствен за целенаправленные осмысленные движения. Однако это не означает, что все такие движения выполняются сознательно под непосредственным управлением головного мозга. Наоборот, для этого уровня характерно стремление к максимальной автоматизации движений на основе обучения, в том числе с помощью сознательно выполняемых упражнений и тренировок. При составлении планов выполнения очередной задачи прежде всего используется весь имеющийся в памяти врожденный и приобретенный опыт решения аналогичных задач в сходных ситуациях в виде готовых алгоритмов действий.

2.5. Стратегический уровень управления движением

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

Выбор целей поведения определяется потребностями, их сравнительной важностью и возможностями их удовлетворения. Потребности проявляются в виде чувств — биологических и социальных; врожденных и приобретенных; инициированных извне или возникших в самом организме (голод, опасность, любопытство и т. д.). Предельно сильным проявлением чувства являются эмоции (гнев, восторг и т. п.).

Существующие в данный момент потребности поступают в виде чувств в ассоциативные области коры больших полушарий головного мозга из лимбической системы в качестве *мотиваций* последующих действий. Там они сопоставляются и принимается решение о ближайшей цели поведения, которая затем реализуется подчиненными уровнями управления движением.

Процедуру выбора доминирующей мотивации можно представить следующим образом. Сигналы об отдельных потребностях вызывают из памяти в ассоциативные области коры соответствующие алгоритмы действий, направленных на их удовлетворение. Последние представляют собой возбужденные зоны нейронных слоев, которые отображают управляющие воздействия на нижележащие уровни управления. Из всех этих порой противоречивых вариантов управления, возбужденные зоны которых взаимно тормозят друг друга, пробивает дорогу вниз к реализации тот вариант, которому соответствует наиболее мощная, т. е. доминирующая над другими, возбужденная зона. Таким образом, выбор доминирующей мотивации осуществляется как бы голосованием нейронов ассоциативной области коры. Например, при внезапном обнаружении какой-либо серьезной опасности вызванное ею возбуждение, в том числе, возможно, сразу от нескольких органов чувств, подавит все другие потребности (чувства) и переключит действие организма на соответствующую этой новой эмоции реакцию (бежать, принять угрожающую позу и т. п.).

Пока в ассоциативной области доминирует определенная возбужденная зона, она является временным центром управления поведением организма до удовлетворения соответствующей потребности или до подавления этого центра появившейся более обширной зоной возбуждения, требующей других действий. При оценке степени достижения поставленной цели критерием опти-

мальности является чувство удовлетворения соответствующей основной потребности. На стратегическом уровне выбранная основная цель обычно разбивается на отдельные подцели, которые последовательно выдаются на тактический уровень. Работа тактического уровня, как упоминалось ранее, начинается каждый раз с формирования моделей среды и организма, ориентированных на спущенную очередную цель, и с высвобождения из памяти отработанных ранее соответствующих планов действий, в которых эта цель в свою очередь может разбиваться на еще более мелкие тактические подцели.

Эффективность работы стратегического уровня как наивысшего в иерархии управления действиями организма определяется степенью оптимальности принимаемых решений, учета при этом различных факторов, способных влиять на эти решения, длительностью охватываемого периода времени. Эти возможности организма обусловлены, прежде всего, объемом памяти и эффективностью ее использования. В памяти — все знания и навыки, сама личность человека.

На общей функциональной схеме системы управления движениями человека на рис. 2.9 показаны, в частности, прямые управляющие воздействия сверху вниз, минующие отдельные промежуточные уровни (пирамидный путь), идущие вверх каналы обратной связи и воздействия на модели среды и тела со стороны стратегического и тактического уровней, осуществляющие подстройку этих моделей под очередную конкретную задачу и используемые для прогнозирования результатов планируемых действий.

Завершая рассмотрение этой системы управления, еще раз подчеркнем, что каждый ее уровень реализует порученную ему операцию путем разбиения на более мелкие типовые операции, находящиеся в арсенале следующего уровня, и последовательной выдачи этому уровню соответствующих команд. Наряду с таким последовательным иерархическим процессом управления здесь, во-первых, осуществляются, как уже упоминалось, прямые воздействия сверху с пропуском отдельных промежуточных уровней, а, во-вторых, отдельные реакции организма на внешние и внутренние возмущения реализуются без участия верхнего уровня определенным промежуточным уровнем в соответствии с его специализацией. Таким образом, все уровни управления в действительности работают как последовательно, так и параллельно, дополняя и резервируя друг друга.

Важными особенностями материальной реализации рассмотренной системы являются ее многоканальность и избыточность. Получение информации, ее обработка, запоминание и преобразование в мышечные усилия осуществляются по тысячам и миллионам параллельно действующих каналов из послойно построенных ансамблей нейронов. Эта информация носит вероятностный характер, как и состав обрабатывающих ее ансамблей нейронов, который сам

определяется этой информацией. (При этом от слоя к слою каждый вид информации — зрительная, акустическая, температурная и т. п. — передается тактированно с распределением ее по слою в соответствии с пространственным размещением отображаемых ею объектов в реальной среде.) Такой принцип параллельной обработки сигналов обеспечивает системе в целом необходимые быстрдействие и надежность, недостижимые пока в технических системах.

2.6. Интеллект и творчество

Рассмотренные ранее функции головного мозга по оценке ситуаций и принятию решений, как уже отмечалось, относятся к разумной мыслительной деятельности человека. В общем виде она определяется способностями человека — интеллектом, т. е. способностью приобретать и целенаправленно использовать знания, и креативностью, т. е. творческими способностями.

Мышление — это пространственно-временной процесс, который совершается в коре и подкорке головного мозга в виде волн активации и торможения. В мозгу есть зоны с фиксированными функциями (обработка сенсорной информации, речь и др.), однако процесс мышления, как и память, охватывает весь мозг. При этом память включает врожденную (генетическую) информацию и приобретаемую благодаря собственному опыту в процессе жизни и обучения в целом. Стимулы, мотивация или, наоборот, торможение мышления определяются эмоциями.

Основа мышления — это стереотипы (безусловные и условные рефлексy) и ассоциации. Отклонение внешней ситуации от комбинаций стереотипов является мотивом для того, чтобы "задуматься" и осуществить корректировку стереотипных реакций. Это процесс обучения. Параллельно идет процесс "борьбы" врожденного творческого начала со стереотипным (догматическим) мышлением и различными запретами (психологическими, социальными, профессиональными и т. п.).

Как известно, головной мозг, включая все рассмотренные его отделы, разбит на два полушария. Правое полушарие оперирует образной информацией, а левое — символьной. В ходе эволюции вначале возникло образное представление о мире на основе сенсорной информации. То же происходит и в ходе развития ребенка. Затем в результате процесса ее обобщения (классификация объектов, абстрагирование) возникает более обобщенное символьное (знаковое) представление о мире с переводом его в слова сначала внутреннего языка, а затем и языков общения во внешнем мире.

Мышление у человека возникло из видения внешнего мира, письменность — из изображения его объектов. У первобытных людей процесс развития мыш-

ления начался с наскальных рисунков отдельных объектов (зверей, людей), затем сцен (охоты, ритуалов и т. п.) и целых рассказов в виде последовательности таких рисунков. Примерно с четвертого тысячелетия до н. э. интенсифицировался процесс упрощения и стилизации изображений предметов. Появилось рисуночное письмо — пиктограммы (клинопись на глиняных пластинах у шумеров, иероглифы в Египте и Китае) и, наконец, буквенное письмо, а затем и фонетическое буквенное, позволяющее произносить написанное (появились буквы и их комбинации, выражающие определенные звуки речи). У новорожденного оба полушария функционируют одинаково, и только постепенно левое полушарие берет на себя функцию логического анализа объектов и ситуаций внешней среды, специализируясь на символическом представлении информации. После этого оба полушария начинают работать поочередно: когда одно активизируется, другое притормаживается. В правом полушарии осуществляется обработка сенсорной информации, включая распознавание образов внешнего мира и построение соответствующей его модели. Левое полушарие отвечает за логическое мышление, языковую и другую знаковую информацию и речь. В нем формируется языковая модель мира. В каждом полушарии существует и своя модель двигательных действий (реакций).

Память правого полушария хранит представления о предметах и явлениях внешнего мира, а левого — понятия, знания, семантику языка. Все это объединено ассоциативными связями. Справа делается оценка по близости, по месту, по времени; слева — по сходству абстрактных логических признаков. Правая память позволяет быстро узнавать объекты, а левая — оценивать их свойства и экстраполировать ситуации. Запоминание в правом полушарии чаще произвольное, а левом — осознанное.

В правом полушарии содержится эмоциональная память, которая определяет личное отношение к ситуациям. Прежде всего, это эмоции, ориентированные на самосохранение и обеспечивающие предельно быструю реакцию на опасность.

Обе модели мира взаимосвязаны. Точки одного полушария срединены с соответствующими точками другого, связывая образную и словесную информацию об одних и тех же объектах и явлениях.

Таким образом, процесс мышления включает две фазы — образную ("правую") и логическую ("левую"). В "правой" фазе мышление осуществляется в виде конкретных операций с образами реальных объектов или с их более абстрактными изображениями, а в "левой" — путем вскрытия логических отношений вне времени и пространства. При этом в процессе мышления происходит циклическая передача решаемой задачи от одного полушария к другому с соответствующим торможением первого и активацией второго. Каж-

дое полушарие, принимая задачу, продолжает ее решение в соответствии со своей моделью мира до исчерпания своих возможностей, после чего передает ее другому полушарию.

Наиболее обобщенный оператор "правого" мышления — это образная и чувственная идея. Для ее передачи в левое полушарие необходимо ее символическое (языковое) описание. "Левое" мышление включает такие логические операции, как анализ, синтез, обобщение.

Инициатором очередного мыслительного процесса может быть любое из полушарий: правое — в виде эмоциональной выдачи какой-то задачи (цели) левому полушарию или начала по той же причине собственного подсознательного интуитивного процесса, левое — как результат сознательно сформулированной задачи. Например, это может быть задача обучения какому-либо техническому приему. Сначала в этом процессе будет доминировать левое полушарие, сознательно управляя движением тела, а затем эти движения перейдут в стереотип правого полушария.

Как отмечено ранее, особым видом мыслительной деятельности является творчество. В его основе лежит интуиция — бессознательное решение задач. Поэтому творческие возможности связаны прежде всего не с эрудицией, т. е. не с левым полушарием мозга, являющимся основой интеллекта, а с воображением, т. е. с правым полушарием, со способностью преодолевать стереотипы и оригинально, нестандартно мыслить. Хотя творческие способности можно развить и эффективному их использованию — научиться, в их основе лежат, прежде всего, врожденные качества личности. Поэтому психологи и отделяют творческие способности — креативность от интеллекта. Их связь сводится к одному: для творчества необходим определенный уровень интеллекта, однако последний не предопределяет творческие возможности.

Творческое начало лежит в основе всех видов человеческой деятельности, включая, прежде всего, искусство, науку и технику. И везде оно является самым загадочным, неконтролируемым и тем более не поддающимся планированию интуитивным процессом. При этом в каждой сфере человеческой деятельности творческий процесс имеет свою существенную специфику. Так, если в искусстве результат творчества всегда субъективен и неотделим от личности автора, то в науке он объективен и не зависит от личности, т. к. отражает закономерности природы. (В отличие от произведений Шекспира законы, получившие имя Ньютона, неизбежно были бы открыты и помимо Ньютона.) И если ученый должен во всем сомневаться, но зато быть совершенно и доказательно уверен в результатах своей деятельности, то, например, инженер-творец техники, наоборот, может быть уверен в положительном результате очередной разработки, но будет полон сомнений и даже желания все сделать по-новому по ее завершении. Если специалистов с такими

подходами к делу и настроем поменять местами, то бывший инженер ничего не откроет в науке, а ученый не создаст в технике. Исключением, которое только подтверждает это правило, являются очень близкие друг другу ученые-организаторы и инженеры-создатели принципиально новой техники. Такие уникальные личности неизбежно носят в себе противоречие, конфликт между этими двумя началами, который все время требует мучительного компромисса.

Всякий творческий процесс является многоэтапным. Подсознательная составляющая творчества является только одним из этапов этого процесса, который включает в целом и этапы сознательной деятельности, охватывая таким образом оба полушария головного мозга и представляя собой как бы диалог сознания с подсознанием. Процесс творчества начинается с сознательного этапа, на котором формулируется задача и делаются попытки ее решения формальными методами. Этот этап запускает следующий уже подсознательный процесс интуитивного поиска решения в виде перебора различных комбинаций и сочетаний в случайном беспорядке образов подсознания, в котором основное значение имеют аналогии и ассоциации.

Что касается критериев отбора решений, то основанием для их извлечения из подсознания является, по-видимому, эстетическое чувство гармонии, красоты решения. Так, по крайней мере, объясняли этот процесс многие великие творческие личности — Гаусс, Гельмгольц, Ламартин, Пуанкаре и др. (Стоит вспомнить критерий А. Н. Туполева при оценке им новых самолетов: "самолет должен быть красивым".)

После подсознательного творческого этапа должен следовать завершающий этап сознательной формулировки найденного решения и обязательной проверки, т. е. доказательства его правильности. Основные средства здесь — эксперимент и математика. (В последнем случае математика выступает только как язык науки, а для понимания реальных процессов нужны понятия самой науки — сила, энергия, информация и т. д.)

ГЛАВА 3

УСТРОЙСТВО РОБОТОВ

3.1. Состав, параметры и классификация роботов

Состав роботов. Как было показано во введении (см. рис. В.1), робот состоит из двух основных частей — исполнительных систем и информационно-управляющей системы с сенсорной системой. В свою очередь исполнительные системы включают манипуляционную систему (обычно в виде механических манипуляторов) и системы передвижения, имеющиеся только у мобильных (подвижных) роботов.

Для того чтобы ознакомиться с характеристиками и параметрами роботов, рассмотрим их классификацию по основным показателям, которые определяют типы роботов, — по назначению, по конструкционным особенностям, по способу управления и по быстродействию и точности движений.

Классификация роботов по назначению. Первым показателем, в соответствии с которым все роботы делятся на наиболее крупные группы, является их назначение, т. е. область применения. Эти области были названы в *параграфе 1.2*. Сегодня основным типом роботов по-прежнему являются *промышленные роботы* (ПР), которые предназначены для применения в отраслях промышленности и составляют до 80 % всего парка роботов в мире.

По типу выполняемых операций все промышленные роботы делятся на *роботы технологические*, которые выполняют основные технологические операции, и *роботы вспомогательные*, предназначенные для выполнения вспомогательных технологических операций по обслуживанию основного технологического оборудования. Технологические роботы относятся к основному технологическому оборудованию, а вспомогательные можно отнести к средствам автоматизации и механизации.

По широте перечня операций, для выполнения которых предназначен робот, различаются роботы специальные, специализированные и универсальные. *Специальные роботы* предназначены для выполнения одной конкретной технологической операции (например, сварка, нанесение покрытий, определенная сборочная операция или обслуживание конкретной марки технологического оборудования). *Специализированные роботы* могут выполнять несколько однотипных операций (сборочный робот со сменными рабочими инструментами, робот для обслуживания определенного типа технологического оборудования и т. п.). *Универсальные роботы* могут выполнять различные основные и вспомогательные операции в пределах их технических возможностей. Увеличение степени универсальности робота расширяет область его возможных применений, но одновременно неизбежно сопровождается недоиспользованием этих возможностей на каждой конкретной операции, а также удорожанием робота. Оптимальными в этом отношении являются специальные роботы, но, с другой стороны, это предельно сужает их область применения, а следовательно, и объем их производства.

Классификация роботов по показателям, определяющим их конструкцию. К таким показателям относятся:

- ☐ тип приводов;
- ☐ грузоподъемность;
- ☐ количество манипуляторов;
- ☐ тип и параметры их рабочей зоны;
- ☐ подвижность и способ размещения;
- ☐ исполнение по назначению.

Приводы, которые используются в манипуляторах и системах передвижения роботов, могут быть электрическими, гидравлическими и пневматическими. Часто их применяют в комбинации. Например, в звеньях манипулятора большой грузоподъемности уместен гидравлический привод, а в его захватном устройстве — более простой и маломощный пневматический привод. Приводы роботов рассмотрены в главе 4.

Грузоподъемность робота — это грузоподъемность его манипуляторов, а для транспортного робота еще и его шасси. Грузоподъемность манипулятора определяется массой перемещаемых им полезных грузов. В зависимости от назначения робота она может составлять от единиц грамм (сверхлегкие роботы, например, применяемые в микроэлектронной промышленности) до тысяч килограмм (сверхтяжелые, например, транспортные и космические роботы). Большинство роботов имеют грузоподъемность от 5 до 50 кг.

Количество манипуляторов у роботов в большинстве случаев ограничено одним. Однако в зависимости от назначения существуют конструкции робо-

тов с двумя-тремя и совсем редко четырьмя манипуляторами. Обычно манипуляторы робота выполняют одинаковыми, но имеются роботы и с манипуляторами разной конструкции. Например, существуют промышленные роботы для обслуживания прессов холодной штамповки с двумя манипуляторами: один — основной, для взятия заготовки и установки ее в пресс и другой, упрощенной конструкции, для выполнения более простой операции изъятия готовой детали.

Тип и параметры рабочей зоны манипулятора. Рабочая зона манипулятора — это пространство, в котором может находиться его рабочий орган при всех возможных положениях звеньев манипулятора. Форма рабочей зоны определяется числом и типом степеней подвижности манипулятора.

Подвижность робота определяется наличием или отсутствием у него системы передвижения. В первом случае роботы называют *мобильными*, а во втором — *стационарными*. В соответствии с назначением роботов в них нашли применение способы передвижения практически всех известных на сегодня типов от наземных (колесных, гусеничных и др.) до предназначенных для передвижения в воде, воздухе и космосе. Специфическим для робототехники способом передвижения является шагание.

По способу размещения стационарные и мобильные роботы бывают напольными, подвесными (например, мобильные роботы, перемещающиеся по поднятому монорельсу) и встраиваемыми в другое оборудование (например, размещаемые на станине обслуживаемого им станка).

Исполнение робота по назначению определяется внешними условиями, в которых он должен функционировать. Различают исполнение нормальное, пылезащитное, теплозащитное, влагозащитное, взрывобезопасное и т. д.

Классификация роботов по способу управления. По этому признаку различают роботы с программным, адаптивным и интеллектуальным управлением.

Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть непрерывным и дискретным (шагами). В последнем случае управление движением осуществляется заданием последовательности точек позиционирования с остановкой в каждой из них.

Классификация роботов по быстродействию и точности движений. Эти параметры взаимосвязаны и характеризуют динамические свойства роботов.

Быстродействие манипулятора определяется линейной скоростью перемещения его рабочего органа и может быть разбито на 3 диапазона:

- ☐ малое — до 0,5 м/с;
- ☐ среднее — от 0,5 до 1—2 м/с;
- ☐ высокое — при больших скоростях.

Наибольшая скорость манипуляторов современных роботов достигает 10 м/с и выше. Для значительной части областей применения роботов этот параметр очень важен, т. к. предопределяет их производительность. Основная трудность при повышении быстродействия связана с известным противоречием между быстродействием и точностью.

Точность манипулятора и системы передвижения робота характеризуется погрешностью позиционирования. Чаще всего она определяется абсолютной погрешностью. Точность роботов общего применения можно разбить на три диапазона в зависимости от линейной погрешности:

- ☐ малая — от 1 мм и более;
- ☐ средняя — от 0,1 до 1 мм;
- ☐ высокая — при меньшей погрешности.

Большинство современных роботов имеют среднюю точность позиционирования. Наименьшую точность имеют роботы, предназначенные для выполнения наиболее грубых, например, транспортных движений, а наибольшую — сотые миллиметра — роботы, используемые в электронной промышленности и медицине.

По сравнению с человеческой рукой существенным недостатком современных роботов пока является снижение точности с увеличением хода манипулятора, в то время как у человека эти параметры в значительной степени развязаны благодаря разделению движений на грубые (быстрые) и точные, как показано в *главе 2*.

Рассмотренные параметры роботов относятся к *классификационным*, т. е. используются при формировании типажа роботов и соответственно их наименования. Примеры названия роботов: легкий пневматический промышленный робот с цикловым управлением для обслуживания прессов холодной штамповки, окрасочный гидравлический промышленный робот и т. д.

Параметры, определяющие технический уровень роботов. К ним относятся и некоторые из ранее рассмотренных параметров, которые могут иметь количественное выражение, такие как: быстродействие, точность. Однако если при использовании этих параметров для классификации роботов их разбивают, как было показано ранее, на классификационные диапазоны и тип робота определяют по принадлежности значения данного параметра к одному из них, то сравнительную оценку технического уровня роботов производят, исходя из конкретных численных значений параметров. При этом широко применяются различные, основанные на указанных ранее параметрах, комбинированные и относительные показатели. К ним относятся, в частности, удельная грузоподъемность, отнесенная к массе робота, выходная мощность манипулятора (произведение грузоподъемности на скорость перемещения),

отнесенная к мощности его приводов; размер рабочей зоны, отнесенный к габаритам робота.

Другими ранее не упоминавшимися параметрами, характеризующими технический уровень роботов, являются число одновременно работающих степеней подвижности, надежность, способы и время программирования.

3.2. Манипуляционные системы

Сегодня основным типом манипуляционных систем роботов являются механические манипуляторы. Они представляют собой пространственные механизмы в виде кинематических цепей из звеньев, образующих кинематические пары с угловым или поступательным относительным движением и системой приводов обычно раздельных для каждой степени подвижности. Манипуляторы заканчиваются рабочим органом.

Степени подвижности манипулятора делятся на *переносные* и *ориентирующие*¹. Переносные степени подвижности служат для перемещения рабочего органа в рабочей зоне манипулятора, а ориентирующие — для его угловой ориентации. Минимально необходимое число переносных степеней подвижности для перемещения рабочего органа в пространстве рабочей зоны равно трем. Однако для расширения манипуляционных возможностей и реализации более сложных траекторий движения, например, с обходом препятствий, а также для повышения быстродействия манипуляторы обычно снабжают несколькими избыточными переносными степенями подвижности, хотя это усложняет и удорожает робот. Современные манипуляторы в среднем имеют 4—6 степеней подвижности, но существуют манипуляторы и с 8—9 такими степенями.

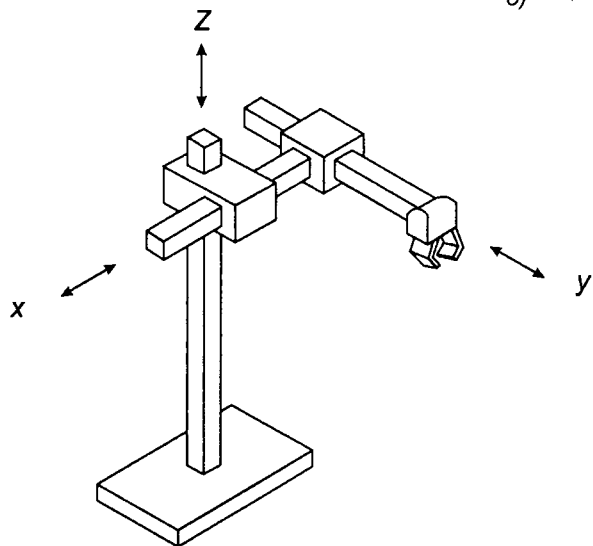
Максимально необходимое число ориентирующих степеней подвижности равно трем. Они реализуются кинематическими парами с угловым перемещением, обеспечивающими поворот рабочего органа манипулятора относительно его продольной и двум другим взаимно перпендикулярным осям.

На рис. 3.1—3.4 показаны конструкции манипуляторов с тремя переносными степенями подвижности в различных системах координат и их рабочие зоны.

Манипуляторы, имеющие все степени подвижности поступательные, работают в *прямоугольной системе координат* (рис. 3.1) и имеют рабочую зону в форме параллелепипеда. На рис. 3.5 показан пример промышленного робота, два вертикально расположенных манипулятора которого работают в *прямоугольной системе координат*.

¹ Следует различать понятия: степень подвижности, которое относится к конструкции, и степень свободы, из теоретической механики.

а)



б)

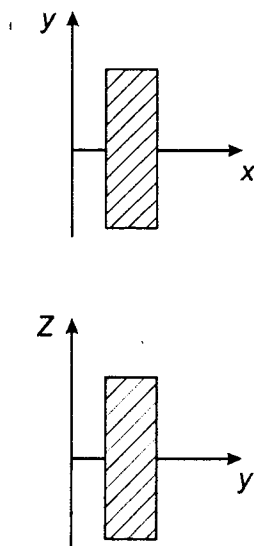
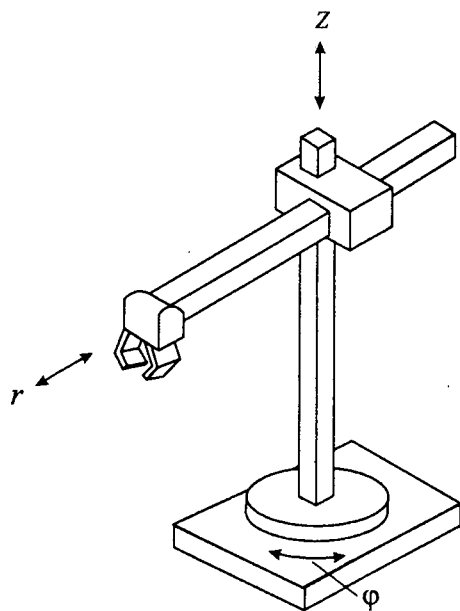


Рис. 3.1. Манипулятор с прямоугольной системой координат (а) и его рабочая зона (б)

а)



б)

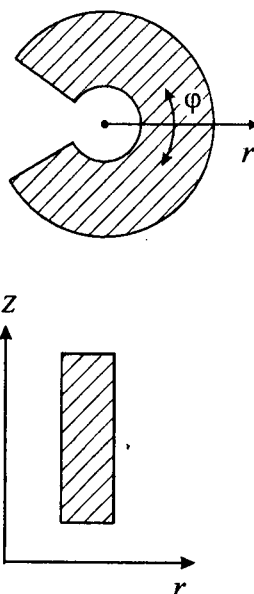


Рис. 3.2. Манипулятор с цилиндрической системой координат (а) и его рабочая зона (б)

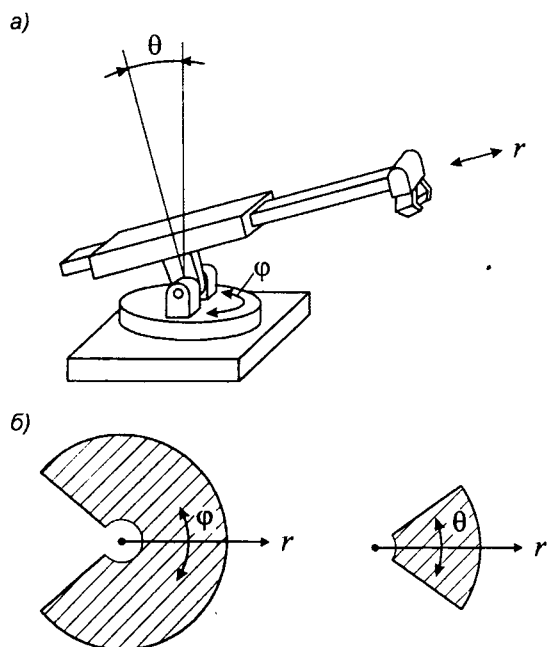


Рис. 3.3. Манипулятор со сферической системой координат (а) и его рабочая зона (б)

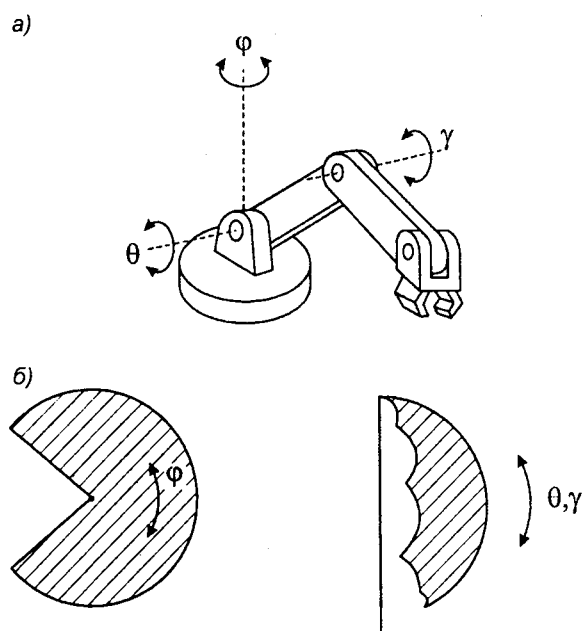


Рис. 3.4. Манипулятор с угловой системой координат (а) и его рабочая зона (б)

Манипуляторы, у которых наряду с поступательными перемещениями осуществляется одно угловое перемещение (по окружности), работают в *цилиндрической системе координат* (см. рис. 3.2). Соответственно их рабочая зона ограничена цилиндрическими поверхностями. В цилиндрической системе координат работает робот, показанный на рис. 1.5.

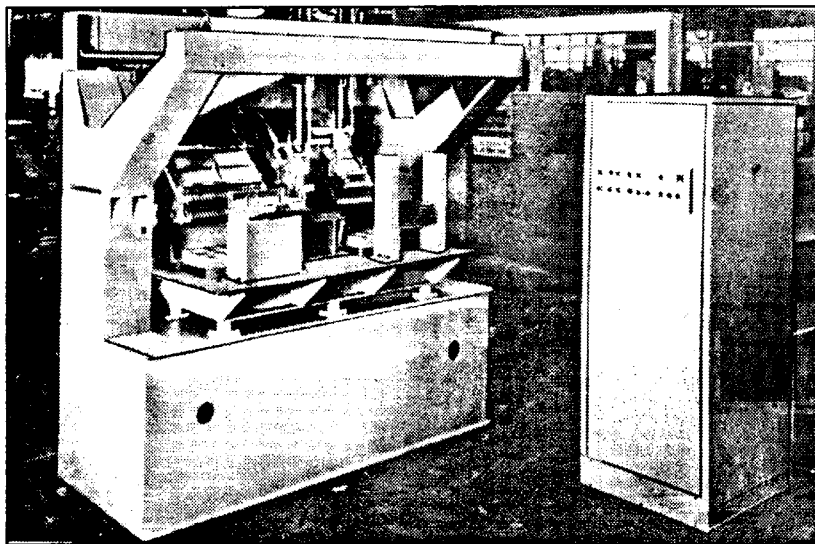


Рис. 3.5. Сборочный промышленный робот SIGMA, справа — шкаф управления (Olivetti, Италия)

На рис. 3.3 показан манипулятор, работающий в *сферической системе координат*. Здесь имеются уже 2 угловых перемещения и рабочая зона ограничена сферическими поверхностями. Такую систему координат имеет, например, манипулятор промышленного робота, показанного на рис. 1.6.

Показанный на рис. 3.4 манипулятор с *угловой системой координат* производит только угловые перемещения, т. е. все его звенья представляют собой шарниры. Поэтому часто такие манипуляторы называют шарнирными или антропоморфными. Роботы с такого типа манипуляторами благодаря возможности последних складываться, не выступая практически за габариты основания робота, обладают наибольшей компактностью, хотя и наиболее сложны в управлении. Такую кинематику имеют манипуляторы роботов, показанных на рис. 3.6 и 3.8.

Манипуляторы реальных роботов содержат большее число степеней подвижности, чем у рассмотренных на рис. 3.1—3.4, поэтому в них используются более сложные комбинации угловых и поступательных степеней подвижности.

Механические системы современных манипуляторов представляют собой, как правило, как было показано, разомкнутые кинематические цепи из подвижно соединенных звеньев, образующих вращательные и поступательные кинематические пары, обычно 5-го класса, т. е. с одной степенью подвижности. Однако применяются и более сложные кинематические схемы манипуляторов с параллельно соединенными звеньями. Пример такой схемы дан на рис. 3.6.

Здесь параллельно основному звену введена тяга, образующая с ним параллелограммный механизм. Он обеспечивает поступательное вертикальное движение рабочего органа при повороте шарнира 3 (при его повороте по часовой стрелке левая тяга поворачивает в том же направлении шарнир 2, сдвигая рабочий орган вправо с окружности относительно точки 3). Такая конструкция упрощает управление движением рабочего органа.

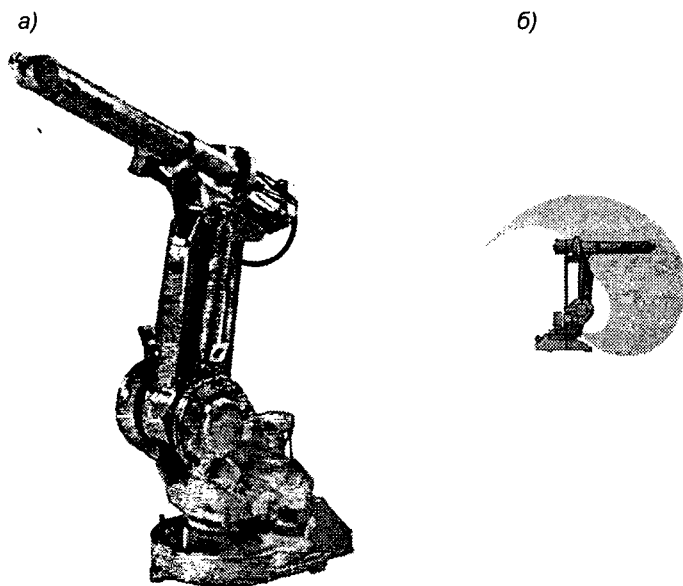


Рис. 3.6. Манипулятор робота IRB 1400(а)
и его конструкция с рабочей зоной (б) (ABB, Швейцария)

На рис. 3.7 показаны другие варианты кинематических схем с параллельным соединением звеньев, нашедшие применение в манипуляторах для повышения их жесткости и маневренности. Схема на рис. 3.7, б называется платформой Стюарта и состоит из 2 пластин, шарнирно соединенных несколькими (минимально тремя) поступательными парами. При изменении длины этих пар происходит пространственное поступательное и угловое перемещение верхней пластины относительно нижней.

На рис. 3.7, в показана реализующая такую кинематику конструкция, получившая применение, в частности, в станкостроении — гексапод. Применяется и последовательное соединение нескольких таких конструкций.

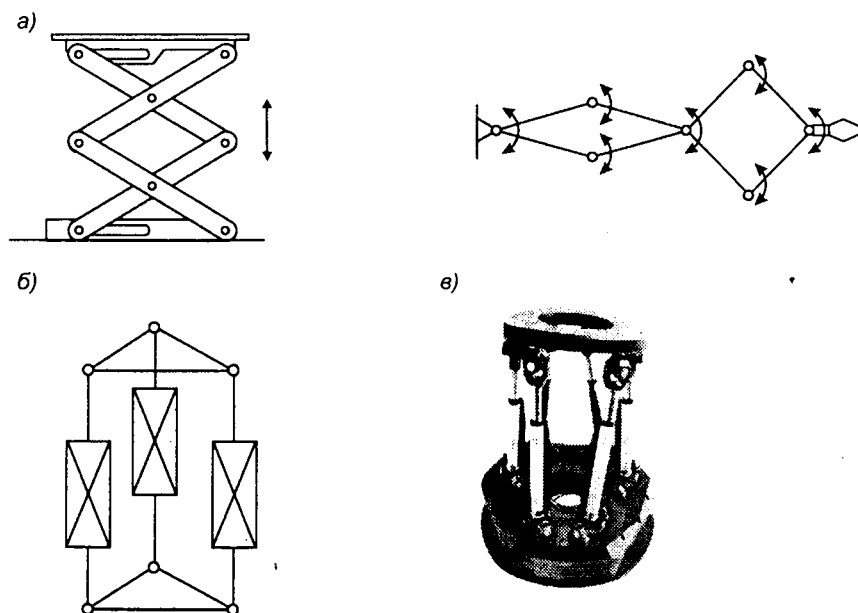


Рис. 3.7. Варианты параллельных кинематических схем

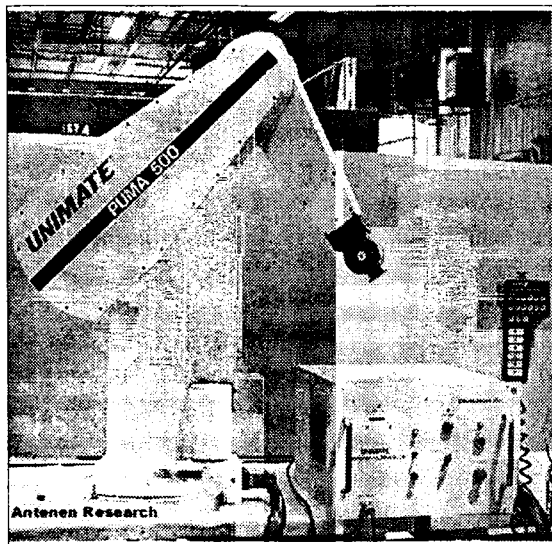
Помимо рассмотренных кинематических схем конструкция манипуляторов определяется также типом и размещением приводов и механизмов передачи движения от них к звеньям манипулятора. Наконец, в манипуляторах часто применяются *устройства уравнивания*, которые также существенно сказываются на конструкции манипуляторов. Рассмотрим особенности размещения и компоновки приводов и устройства уравнивания манипуляторов.

С точки зрения простоты передачи движения от двигателя к звену манипулятора лучше всего, конечно, размещать двигатели непосредственно у перемещаемых ими звеньев. Однако такая компоновка манипулятора приводит к существенному увеличению его габаритов и движущихся масс. Этот недостаток тем существеннее, чем дальше рассматриваемое звено манипулятора находится от его основания и ближе к рабочему органу, т. к. тем большее число предыдущих звеньев и их приводов нагружается этим звеном. Поэтому чем дальше звено от основания манипулятора, тем больший эффект дает перенос его двигателя на одно из предыдущих звеньев, поближе к основанию манипулятора. Конечно, это требует введения соответствующих механизмов пере-

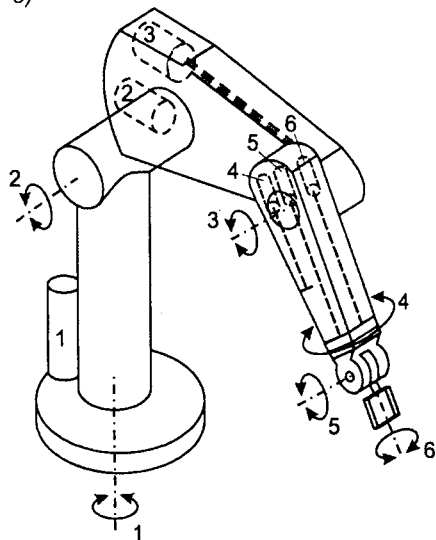
дачи движения от двигателя к звену, что усложняет конструкцию манипулятора.

В манипуляторе, показанном на рис. 3.8, двигатель привода 1-й степени подвижности вокруг вертикальной оси размещен на основании манипулятора.

а)



б)



в)

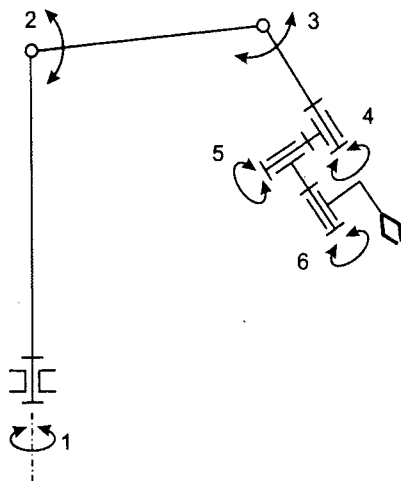


Рис. 3.8. Манипулятор промышленного робота Puma (а), его конструкция (б) и его кинематическая схема (в) (Unimate, США)

Двигатели степеней подвижности 2 и 3 размещены рядом на 2-м звене. С приводимыми ими осями они связаны через редукторы, а двигатель 3 еще и валом с шарнирами Гука. Двигатели степеней подвижности 4, 5 и 6 размещены на 3-м звене манипулятора. Передача движения от них осуществляется через валы с шарнирами Гука и зубчатые передачи. Размещение этих двигателей с другой стороны оси вращения звена относительно основной его части обеспечивает статическое уравнивание веса этих звеньев манипулятора относительно осей их вращения и соответственно разгружает двигатели 2 и 3.

В манипуляторе, показанном на рис. 3.6, двигатель 1-й степени подвижности также размещен на основании манипулятора. Движение от него передается на подвижный корпус манипулятора через волновую передачу. Двигатели остальных степеней подвижности, включая ориентирующие степени подвижности рабочего органа, размещены на подвижном корпусе. (Двигатели обозначены теми же цифрами, что и связанные с ними степени подвижности.) Передача движения от двигателей 2 и 3 осуществляется через шарико-винтовые передачи и систему рычагов и тяг. Передача движения на ориентирующие степени подвижности рабочего органа — наклон в вертикальной плоскости 4 и поворот 5 — осуществляются через систему тяг, образующих параллелограммы, которые на рис. 3.6, б не показаны.

На рис. 3.9 приведен пример предельного варианта компоновки манипулятора с семью степенями подвижности, у которого все двигатели размещены на его основании, а передача движения от них к звеньям манипулятора осуществляется через вставленные друг в друга трубчатые валы и конические зубчатые передачи в шарнирах манипулятора. Соответственно в первое от основания манипулятора звено входит 7 валов, во второе — 6, а в последнее, на котором размещен рабочий орган в виде схвата, — 2 вала для его вращения относительно продольной оси и для привода схвата. Соответственно изменяется и число зубчатых передач в шарнирах манипулятора от первого до последнего.

Такая компоновка применяется в копирующих манипуляторах, предназначенных для работы с опасными объектами (например, радиоактивными), чтобы вынести приводы из рабочей зоны. Кроме того, как было отмечено, подобная компоновка обеспечивает минимальные габариты манипулятора, что в этом случае также весьма существенно.

Другой предельный случай — размещение двигателей непосредственно при приводимых ими звеньях — нашел применение в манипуляторах с безредукторными (прямыми) электрическими приводами и линейными электрическими приводами. Отсутствие в этом случае редукторов и механических передач позволяет обеспечить наиболее высокую точность позиционирования благодаря повышенной жесткости и отсутствию зазоров.

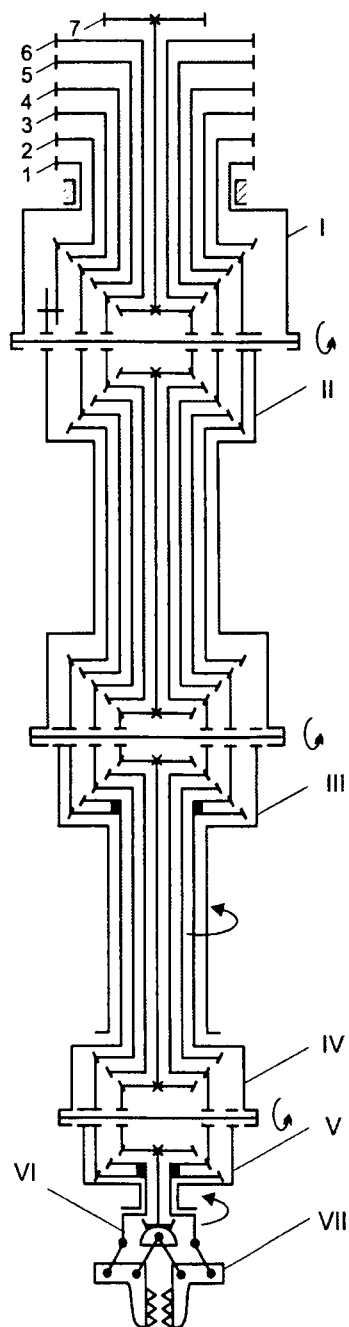


Рис. 3.9. Кинематическая схема манипулятора МЗМ-10 СД: I—VII — звенья манипулятора; 1—7 — зубчатые колеса, соединенные с двигателями этих звеньев (СССР)

Оригинальным решением по улучшению динамических возможностей шарнирных манипуляторов является их размещение в горизонтальной плоскости. При этом разгрузка двигателей от веса звеньев манипулятора и полезного груза позволила существенно повысить быстродействие, доведя скорость рабочего органа до 10 м/с и выше. Манипуляторы с такой компоновкой нашли широкое применение на сборочных операциях. На рис. 3.10 показан пример такого манипулятора.

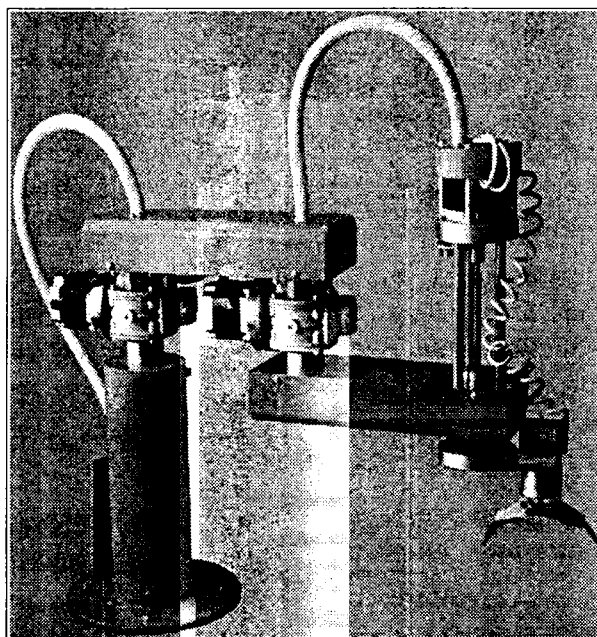


Рис. 3.10. Манипулятор типа SCARA
(Уральские технические системы, Россия)

Как было отмечено ранее, важным компонентом манипуляторов являются системы уравнивания. Эти системы осуществляют статическую разгрузку приводов от веса элементов конструкции манипулятора и полезного груза, что позволяет существенно снизить усилие и мощность, требуемые от приводов. Существуют два способа такого уравнивания — *пассивное* и *активное*. Первый способ основан на применении уравнивающих грузов и пружин. В манипуляторе, показанном на рис. 3.6, применен такой уравнивающий груз УГ, с помощью которого осуществляется разгрузка двигателей 2 и 3.

Очевидный недостаток уравнивания с помощью грузов состоит в увеличении массы манипулятора и соответствующем снижении быстродействия. Поэтому данный способ нашел применение только в достаточно медленно

действующих манипуляторах небольшой грузоподъемности. Часто в качестве уравнивающих грузов используются элементы конструкции самого манипулятора, когда указанный ранее недостаток исчезает. Примером такого решения является рассмотренная ранее компоновка звеньев манипулятора на рис. 3.8.

Более универсальным вариантом пассивного уравнивания является использование пружин. Например, в манипуляторе робота на рис. 3.6 вместо уравнивающего груза может быть применена пружина. Именно такое решение использовано в некоторых последующих модификациях этого робота.

Способ активного уравнивания основан на применении для компенсации веса частей манипулятора простых дополнительных нерегулируемых двигателей, действующих параллельно с основными и развивающих усилие, равное статической нагрузке от этих частей.

Особую группу манипуляционных систем образуют манипуляторы с *управляемой деформацией*. На рис. 3.11 показаны возможные варианты их принципов действия. Схема на рис. 3.11, а состоит из набора сферических дисков. В дисках имеются центральное отверстие и 4 отверстия по периферии. Через эти отверстия пропущены тросы. Их концы закреплены на последнем (верхнем) диске. С другой стороны нижние концы периферийных тросов попарно присоединены к двум приводам, вращение которых вызывает деформацию всей конструкции и перемещение ее конца, на котором должен быть укреплен рабочий орган манипуляционной системы. Центральный трос соединен

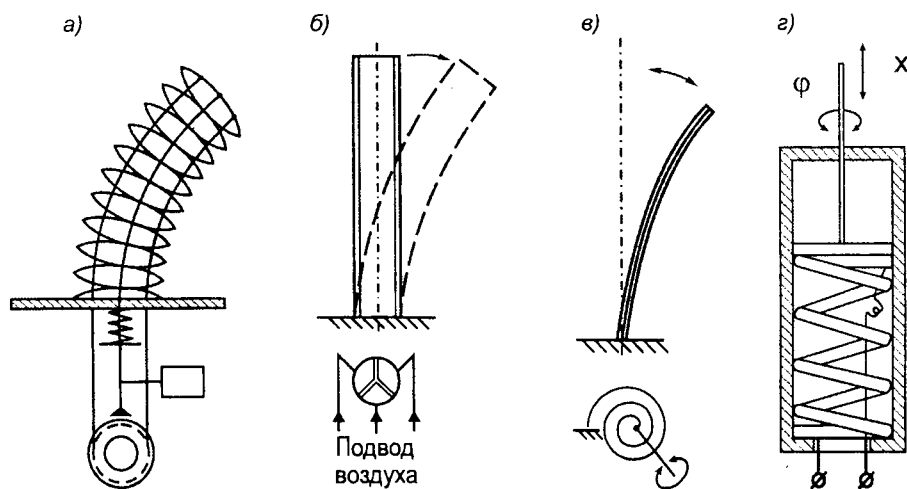


Рис. 3.11. Кинематические схемы устройств с управляемой деформацией

внизу с пружиной, которая осуществляет ее натяжение, центрируя всю систему дисков. Последовательное соединение нескольких таких наборов дисков со своей системой приводов позволяет создавать манипуляционные системы типа хобота, способные принимать волнообразные пространственные конфигурации и перемещать рабочий орган при наличии препятствий и ограничений.

На рис. 3.11, б показано аналогичное пространственно изгибающееся устройство, но на пневматике. Оно состоит из трех жестко скрепленных эластичных трубок. Верхний конец трубок закрыт, а снизу подведен сжатый воздух. При одинаковом давлении во всех трубках устройство находится в вертикальном положении. При разных значениях давления в трубках оно изгибается в сторону трубок с меньшим давлением. Как и в предыдущем устройстве, последовательное соединение таких секций со своей системой подачи воздуха позволяет получать более сложные пространственные конфигурации с перегибами.

На рис. 3.11, в приведены 2 примера звена манипуляционной системы, в котором применен биметаллический элемент, деформируемый при нагревании пропускаемым через него электрическим током. В первой схеме реализуется поступательное перемещение конца звена, а во второй — вращательное. Манипуляционные системы состояются из таких последовательно соединенных элементов. В микроприводах (см. параграф 4.8) нашли применение аналогичные электромеханические преобразователи на пьезоэлектрических пластинах.

На рис. 3.11, г показан подвижный элемент, основанный на эффекте памяти формы. Этот эффект, которым обладают некоторые металлические сплавы, состоит в следующем. Если деформировать (согнуть, закрутить) стержень из такого материала, а затем нагреть его до определенной температуры, то деформация исчезнет, а при остывании стержня она восстановится. На рис. 3.11, г показан пример такого подвижного элемента в виде пружины, которая при нагреве электрическим током осуществляет поступательное (x) или вращательное (φ) перемещение в зависимости от вида предварительной деформации пружины.

Общей особенностью приведенных на рис. 3.11 схем является то, что их элементы активные, т. е. в них подвижное звено манипулятора совмещено с приводом. Другая связанная с этим же особенность — эти схемы представляют собой системы с распределенными параметрами, т. е. не имеют конечного числа степеней подвижности.

Ранее были описаны следующие три типа кинематических схем, которые используются в механических манипуляторах:

- разомкнутые кинематические цепи из жестких звеньев (основной тип для современных манипуляторов);

- ☐ кинематические цепи, включающие параллельно соединенные звенья;
- ☐ кинематические схемы с управляемой деформацией.

Наряду с манипуляционными системами в виде механических манипуляторов существует пока еще не получивший достаточно широкого распространения другой тип манипуляционных систем без подвижных частей. В них манипуляционные операции осуществляются с помощью электромагнитных и других силовых полей. Так, существуют устройства сварки электронным лучом в вакууме. Двухкоординатное перемещение луча осуществляется с помощью электрического или магнитного поля. Аналогично работают устройства для сварки, резки и раскроя различных материалов лазерным лучом. (Они существуют наряду с лазерными роботами традиционной конструкции, в которых лазерный луч от генератора проходит внутри полого манипулятора.) Известны также системы управляемого перемещения и ориентации легких объектов в управляемом электромагнитном поле.

3.3. Рабочие органы манипуляторов

Рабочие органы манипуляторов служат для непосредственного взаимодействия с объектами внешней среды и делятся на *захватные устройства* и *рабочий инструмент*. Рабочие органы могут быть постоянными и съемными, в том числе с возможностью их автоматической замены в ходе выполнения технологической операции.

Захватные устройства. Они предназначены для того, чтобы брать объект, удерживать его в процессе манипулирования и освободить по окончании этого процесса. Основные типы захватных устройств — это механические устройства-схваты, пневматические и электромагнитные. Кроме того, в связи с большим разнообразием объектов манипулирования существует большое количество различных комбинаций этих типов захватных устройств и множество специальных захватных устройств, основанных на различных оригинальных принципах действия (например, клейкие захватные устройства, накалывающие, использующие аэродинамическую подъемную силу и т. п.).

Схват — это аналог кисти руки человека. Самые простые двухпальцевые схваты напоминают обычные плоскогубцы, но снабженные приводом. На рис. 3.12 показана конструкция подобного схвата с пневматическим приводом. В зависимости от объектов манипулирования применяют схваты с 3, 4, 5, реже с большим числом пальцев. На рис. 3.13 показан схват с пятью пальцами. В связи с простотой совершаемых схватами движений ("зажим-разжим") в них обычно применяются пневматические и нерегулируемые электрические приводы.

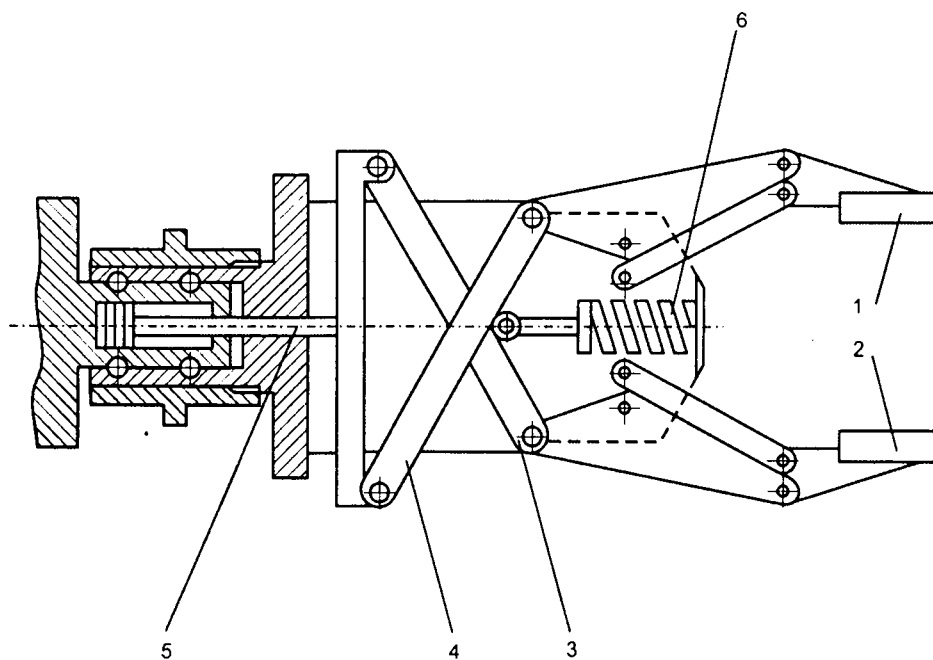


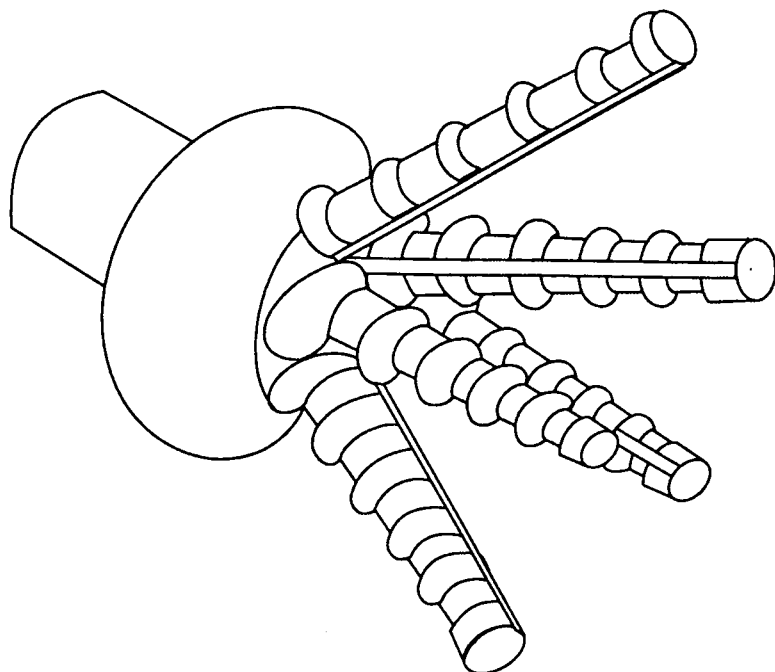
Рис. 3.12. Двухпальцевый схват: 1, 2 — пальцы (губки); 3, 4 — рычажная передача; 5 — шток пневматического двигателя (пневмоцилиндра); 6 — возвратная пружина



Рис. 3.13. Схват с пятью пальцами (Shadow Robot Company, США)

На рис. 3.14 показан пневматический схват с пятью гибкими надувными пальцами. За счет разной жесткости пальцев в сечении при подаче в них сжатого воздуха они изгибаются, захватывая находящиеся в их зоне предметы.

а)



б)

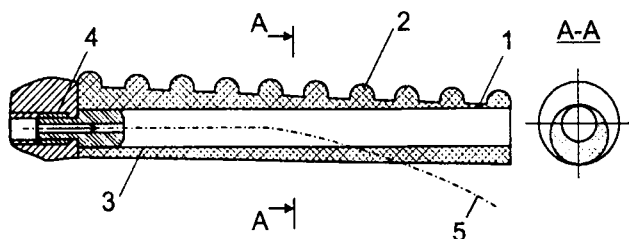


Рис. 3.14. Пневматический схват с пятью гибкими надувными пальцами: а — внешний вид; б — разрез пальца; 1 — тонкостенная часть; 2 — гофры; 3 — толстостенная часть; 4 — подвод воздуха; 5 — деформация оси пальца при подаче сжатого воздуха

Схваты часто очувствляют с помощью контактных датчиков силы, проскальзывания и дистанционных датчиков (ультразвуковых, оптических и др.), выявляющих предметы вблизи схвата и между его пальцами.

Распространенным типом захватных устройств являются вакуумные захватные устройства, использующие вакуумные присоски, которые удерживают

объекты за счет разряжения воздуха при его отсосе из полости между присоской и захватываемым объектом (рис. 3.15). Для захватывания объектов сложной формы применяют вакуумные захватные устройства с несколькими присосками.

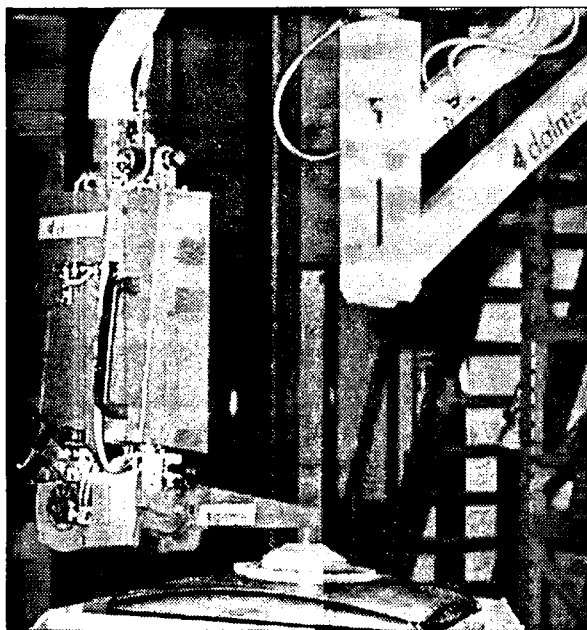


Рис. 3.15. Вакуумное захватное устройство (на манипуляторе)

Для взятия ферромагнитных объектов применяются магнитные захватные устройства. В работах нашли применение в основном такие захватные устройства с электромагнитами, но имеются устройства и с постоянными магнитами. (Для освобождения захваченного объекта они снабжены специальными механическими выталкивателями.)

Захватные устройства бывают универсальными и специальными (например, для работы с хрупкими и протяженными предметами, тканями и т. д.).

Захватные устройства часто присоединяют к последнему звену манипулятора через промежуточные, податливые конструктивные элементы. С их помощью осуществляется компенсация возможных неточностей позиционирования и устраняются возникающие при этом механические напряжения в звеньях манипулятора в случаях манипулирования объектами, на перемещение которых наложены механические ограничения (механическая сборка и разборка, установка заготовок в зажимы и гнезда технологического оборудования, перемещение предметов по направляющей и т. п.).

Рабочий инструмент. В случаях, когда объектом манипулирования является рабочий инструмент, с помощью которого робот выполняет определенные технологические операции (нанесение покрытий, сварка, завинчивание гаек, зачистка поверхностей и т. п.), этот инструмент, как правило, не берется захватным устройством, а непосредственно крепится к манипулятору на его месте. Часто при этом к инструменту необходимо обеспечить подвод энергии или какого-либо рабочего тела. Для окрасочного робота — это краска и воздух к пульверизатору, для сварочного робота — сварочный ток, проволочный электрод, газ, охлаждающая вода и т. д. Для этого требуются манипуляторы специальной конструкции.

3.4. Системы передвижения мобильных роботов

Системы передвижения роботов относятся к их исполнительным системам наряду с манипуляционными системами. В них нашли применение практически все известные транспортные средства. Кроме того, предметом робототехники являются различные бионические способы передвижения (локомоций), заимствованные у живой природы и не освоенные еще в технике. К ним, прежде всего, относится шагание. Основной частью всех систем передвижения являются *движители*, преобразующие усилие от двигателей в усилие, движущее систему передвижения.

По типу внешней среды средства передвижения подразделяются на наземные, водные, воздушные и космические, а по широте применения — на универсальные и специальные. Наземные универсальные системы передвижения — это прежде всего традиционные колесные и гусеничные транспортные средства, а также шагающие (стопоходящие). Первые наземные мобильные роботы были созданы для расширения рабочей зоны их манипуляторов, а также для выполнения чисто транспортных операций (внутрицеховой и другой транспорт). На рис. 3.16 и 3.17 показаны примеры мобильных роботов на колесном и гусеничном ходу.

Промышленные роботы, предназначенные для выполнения только транспортных операций по перевозке грузов, — *робокары* часто не имеют манипуляторов, а снабжены упрощенными одно- и двухступенными погрузо-разгрузочными устройствами. Последние операции могут также выполняться стационарными манипуляторами, находящимися в местах остановки этих роботов.

На рис. 3.18 показан транспортный робот подвесного типа, который передвигается по монорельсовому пути. Внизу видны захватное устройство и защитная сетка, предохраняющая от самопроизвольного падения переносимого



Рис. 3.16. Мобильный робот на колесном ходу Robby (NASA, США)

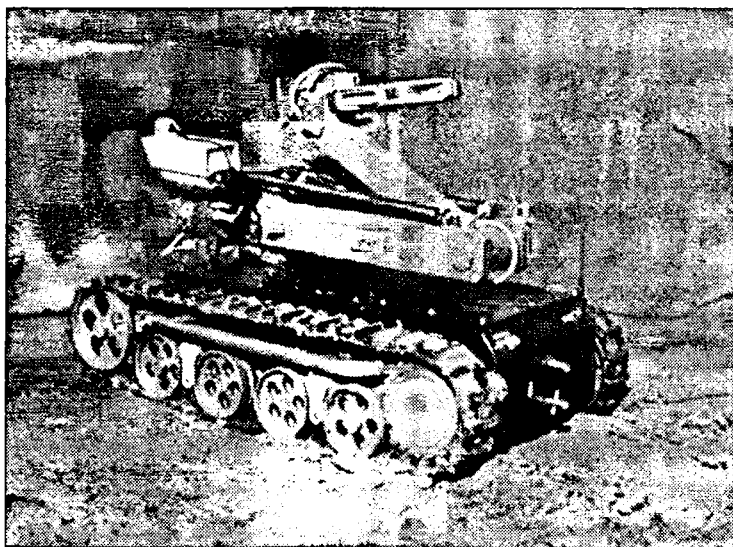


Рис. 3.17. Мобильный робот на гусеничном ходу Варан (МГТУ, Россия)

груза. На рис. 3.19 и 3.20 показаны примеры специальных средств передвижения роботов — робот, предназначенный для передвижения по вертикальным и наклонным поверхностям, и робот для обследования трубопроводов. Передвижение последнего осуществляется путем поочередного закрепления концов корпуса и сокращения его длины на основе эффекта памяти формы.

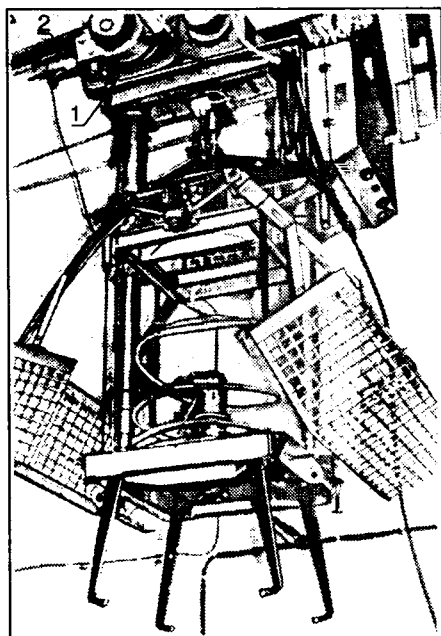


Рис. 3.18. Подвесной транспортный промышленный робот ТРТ-1-2500:
1 — тележка; 2 — монорельс (ЦНИИ РТК, Россия)

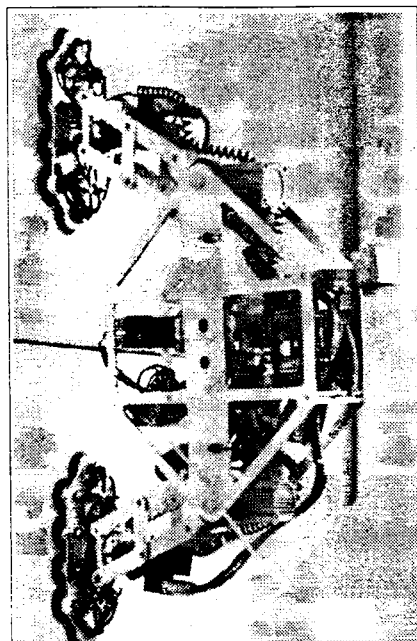


Рис. 3.19. Робот-стенолаз Roma (Universidad Carlos III, Испания)

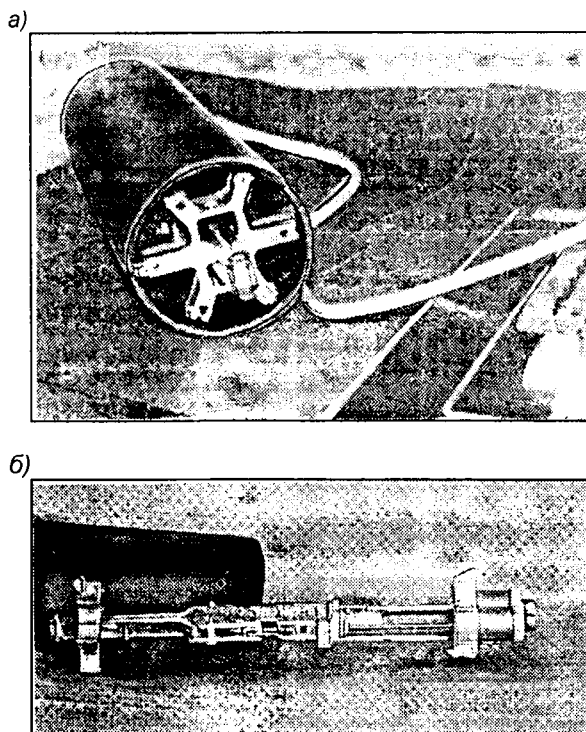


Рис. 3.20. Робот-труболаз для обследования трубопроводов:
а — внутри трубы; б — вне трубы (ЦНИИ РТК, Россия)

Особый раздел робототехники составляют шагающие системы передвижения и основанные на них транспортные машины. Они являются предметом робототехники потому, что механические ноги — педипуляторы (от латинского слова *pes, pedis* — нога) — наиболее близки другому основному объекту робототехники — манипуляторам. Однако значение и потенциальные области применения шагающих машин выходят за пределы робототехники. Способ передвижения с помощью ног (шагание, бег, прыгание), как известно, является наиболее распространенным в живой природе. Однако в технике он еще не получил заметного применения прежде всего из-за сложности управления.

Развитие робототехники создало необходимую научно-техническую основу для реализации этого принципиально нового для техники способа передвижения и для создания нового типа транспортных машин — шагающих.

Шагающий способ представляет основной интерес для движения по сложной неподготовленной местности с препятствиями. Традиционные колесные и гусеничные транспортные машины оставляют за собой непрерывную колею, тратя на это значительно большую энергию, чем в случае передвижения ша-

гами, когда взаимодействие с грунтом происходит только в местах упора стопы. Помимо этого шагающий способ передвижения обладает и большей проходимостью на пересеченной местности вплоть до возможности передвигаться прыжками, преодолевать препятствия и т. п. При шагающем способе меньше разрушается грунт, что, например, важно в тундре. При передвижении по достаточно гладким и подготовленным поверхностям этот способ, конечно, уступает колесному в экономичности, скорости передвижения и простоте управления.

Система управления шагающей машины должна обеспечивать решение следующих задач:

- ☐ стабилизация в процессе движения положения корпуса машины в пространстве на определенной высоте от грунта независимо от рельефа местности;
- ☐ связанное управление ногами, реализующее определенную походку с адаптацией к рельефу местности;
- ☐ обеспечение движения по заданному маршруту с обходом препятствий.

Поскольку основное назначение шагающих машин — передвижение по сильно пересеченной местности, управление ими обязательно должно быть адаптивным. При этом система управления имеет обычно следующие 3 уровня управления:

- ☐ первый, нижний уровень — управление приводами степеней подвижности ног;
- ☐ второй уровень — построение походки, т. е. координации движений ног со стабилизацией при этом положения корпуса машины в пространстве;
- ☐ третий уровень — формирование типа походки, направления и скорости движения, исходя из заданного маршрута в целом.

Первый и второй уровни реализуются автоматически, а третий уровень может осуществляться с участием человека-оператора ("водителя").

Попытки создать шагающие аппараты предпринимались давно. Одна из первых моделей стопоходящей машины была создана в XIX веке математиком и механиком П. Л. Чебышевым. На рис. 3.21 показан четырехногий шагающий робот для сбора разлитых нефтепродуктов. На рис. 3.22 приведен пример шагающего транспортного робота-носильщика, предназначенного для армии. Ноги робота имеют гидравлические приводы. Источник энергоснабжения — двигатель внутреннего сгорания.

Хотя, как уже упоминалось, шагающий способ передвижения еще не получил практического применения на транспорте вследствие его сложности, в комбинации с другими более традиционными способами он уже используется.

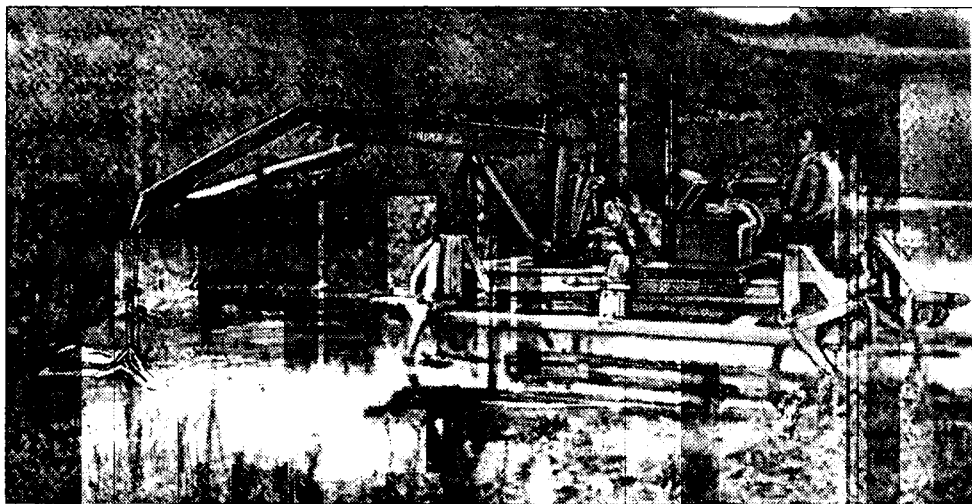


Рис. 3.21. Мобильный шагающий робот "Восьминог" для сбора разлитых нефтепродуктов (Волгоградский ГТУ, Россия)

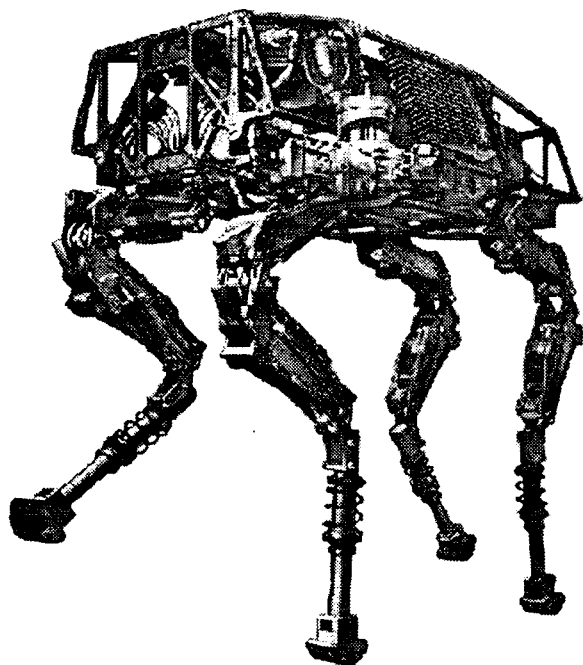


Рис. 3.22. Военный шагающий транспортный робот Big Dog (Boston Dynamics, США)

В частности, реализована комбинация колесного и шагающего способов передвижения в так называемых колесно-шагающих транспортных машинах [3]. Применяются два варианта такой комбинации. В первом случае режимы качения и шагания осуществляются раздельно и последовательно с помощью отдельных приводов. Например, колеса устанавливаются на концах вертикальных рычагов подвески, которые могут поворачиваться на 360° относительно корпуса машины. При включении приводов этих рычагов машина передвигается на них, опираясь на колеса. При вертикальном положении рычагов подвески машина движется на колесах в режиме обычного качения. На рис. 3.23 показан образец мобильного робота с такой системой передвижения. Во втором варианте оба режима — качение и шагание — осуществляются одновременно. Опоры механизма шагания выполняются в виде колес и перемещаются вперед относительно корпуса машины без отрыва от грунта. При этом колеса, вращаясь, участвуют в создании тягового усилия.

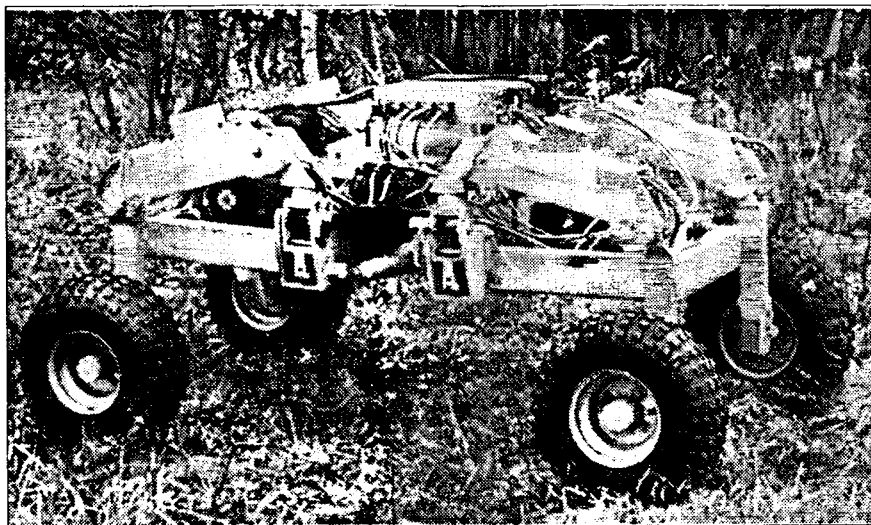


Рис. 3.23. Колесно-шагающий робот Wark Partner (Rover Company, США)

Наряду с освоением способа передвижения шаганием ведутся научно-исследовательские работы по техническому освоению другого способа наземного передвижения — ползания. Как и шагание, этот способ обладает уникальной универсальностью и проходимостью, включая возможность передвижения в воде и под землей. Трудности освоения этого способа передвижения аналогичны шаганию и вообще всем способам передвижения живых организмов и заключаются в сложности кинематики и алгоритмов управления. На рис. 3.24 показан экспериментальный образец ползающего змееподобного устройства.

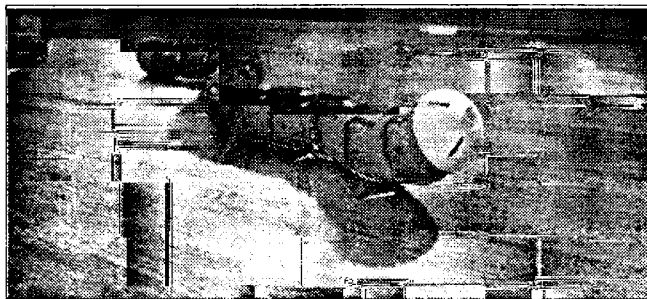


Рис. 3.24. Ползающий робот "Змеелог-2" (ЦНИИ РТК, Россия)

Водные системы передвижения роботов основаны на традиционных средствах водного транспорта. На рис. 1.11 был показан один из первых отечественных подводных роботов "Манта", в котором использованы винтовые движители для погружения, поступательного движения и маневрирования. Такие же движители применяются и во всех последующих конструкциях подводных роботов. Их типовая система передвижения включает 1 или 2 вертикально направленных движителя заглубления и 2 или 3 поворотных движителя, создающих управляемый по направлению и величине продольный вектор тяги для поступательного движения аппарата. Двигатели, входящие в состав этих движителей, — обычно электрические постоянного тока.

Новым направлением в создании систем передвижения роботов в воде является техническое освоение способов плавания живых организмов с помощью плавников и путем волнообразного движения всего тела. На рис. 3.25 показан экспериментальный образец плавучего средства с движителем, подобным хвосту рыбы. К достоинствам таких средств плавания отно-

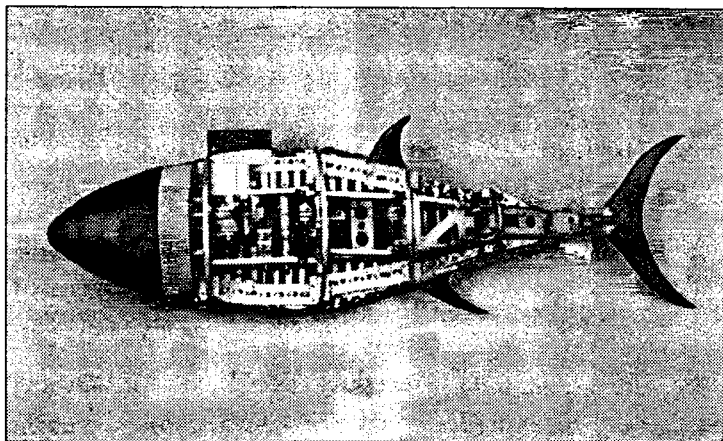


Рис. 3.25. Робот-рыба Tuna (MTI, США)

ся их экологическая чистота, бесшумность и способность осуществлять позиционирование в заданной точке в условиях различных возмущающих воздействий со стороны внешней среды (течение, волнение и т. п.).

Воздушные системы передвижения, как и водные, развиваются по двум направлениям: во-первых, используются давно освоенные способы полета, а во-вторых, ведутся исследования по освоению машущих способов полета, известных в живой природе. На рис. 3.26 показан один из экспериментальных образцов подобного аппарата. Размах его крыльев — 10 см, время полета — до 3 мин.

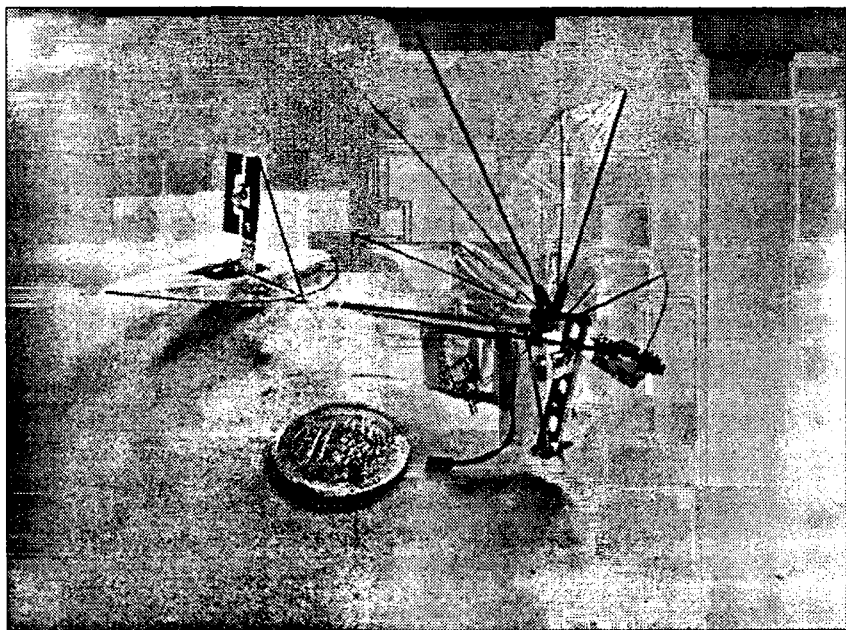


Рис. 3.26. Летательный аппарат с машущими крыльями Del Fly Micko (Technische Universiteit Delft, Нидерланды)

Космические системы передвижения разделяются на системы для свободно летающих роботов, для роботов, обслуживающих космические аппараты, и для напланетных роботов. На рис. 3.27 показан пример конструкции свободнолетающего робота. Он имеет двигательную установку с системой двигателей, создающих усилие по отдельным степеням подвижности робота, систему питания двигателей с топливными баками, два манипулятора, навигационную систему, систему ориентации робота, систему радиосвязи, телевизионную систему, включающую две неподвижные и одну подвижную передающие телевизионные камеры, а также осветители. Поперечный размер робота 1 м, масса около 200 кг.

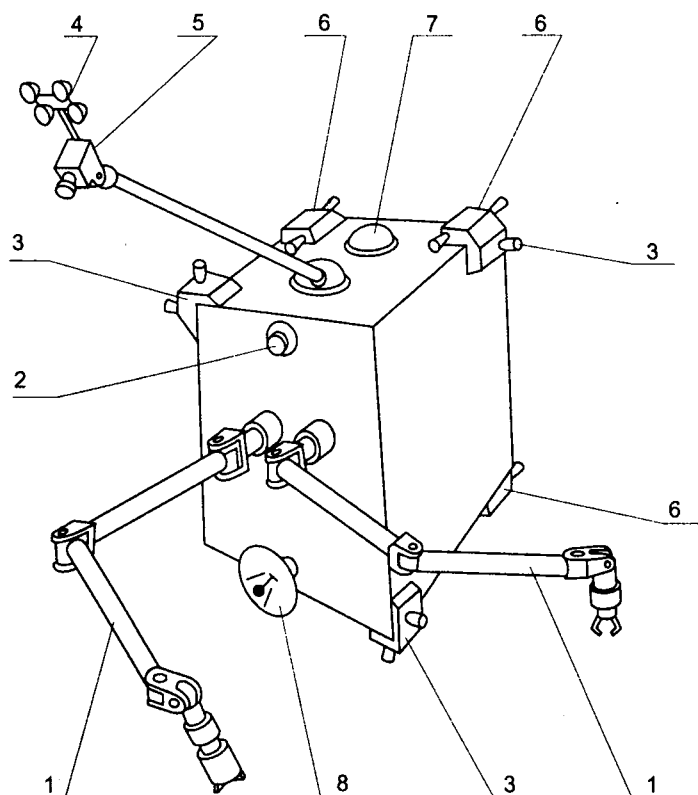


Рис. 3.27. Свободнолетающий космический робот: 1 — манипуляторы; 2 — неподвижная телекамера; 3 — двигатели ориентации; 4 — осветители; 5 — подвижная телекамера; 6 — двигатели движения вперед-назад; 7 — радиоантенна; 8 — радиолокатор

На рис. 3.28 приведен образец космического шагающего робота для наружного обслуживания орбитальных космических станций. Он представляет собой манипулятор, оба конца которого являются рабочими органами в виде стыковочного устройства. С их помощью манипулятор шагает по расположенным на поверхности обслуживаемого объекта такелажным элементам, через которые он получает электроэнергию и осуществляет связь с пультом управления.

На рис. 3.29 показан отечественный напланетный космический аппарат Луноход. Два таких робота в 1970—73 годах проехали по поверхности Луны около 50 км, проводя обследование ее физико-химических свойств, радиационной и магнитной обстановки. На рис. 3.30 приведена фотография марсохода Spirit. Это мобильный робот, снабженный буром, спектрометрами и другими датчиками, исследует поверхность Марса с января 2004 года, в т. ч. в поиске признаков жизни.

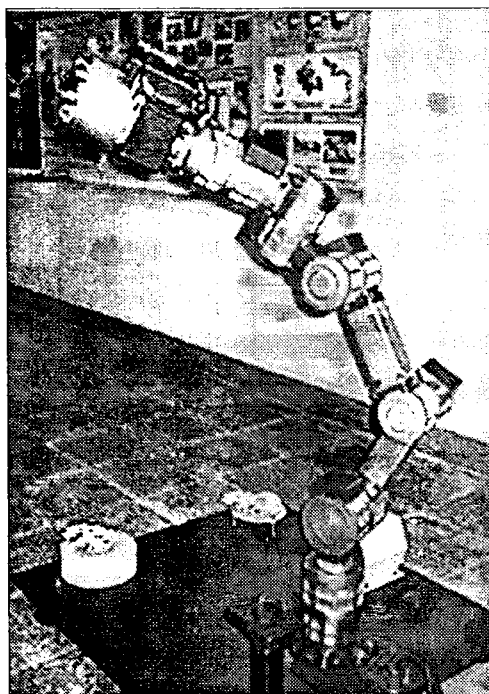


Рис. 3.28. Космический манипулятор Дорес (ЦНИИ РТК, Россия)

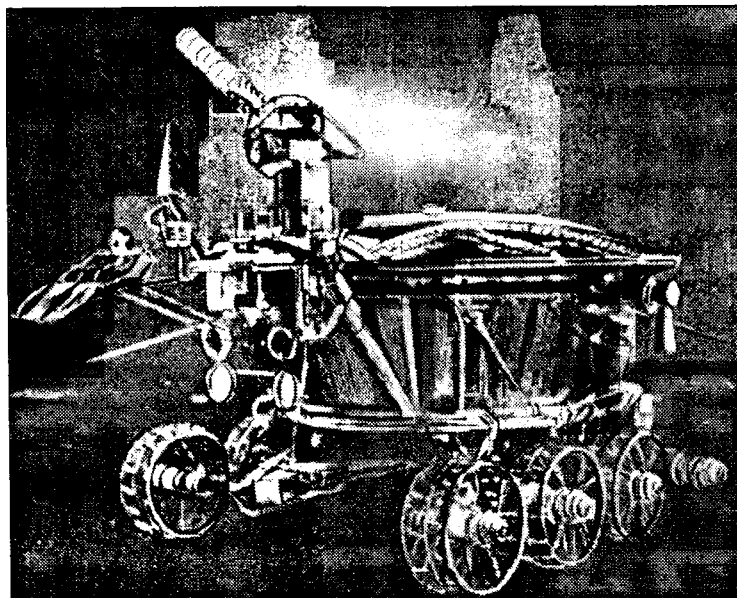


Рис. 3.29. Напланетный космический аппарат Луноход (СССР)

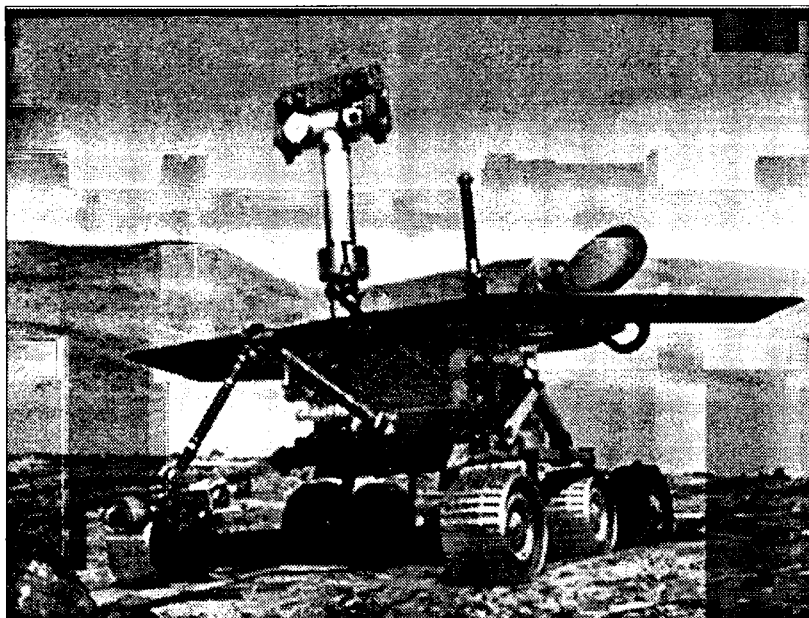


Рис. 3.30. Марсоход Spirit (NASA, США)

3.5. Сенсорные системы

Сенсорные системы предназначены для получения информации о внешней среде и положении робота в ней. В отдельных системах роботов имеются также различные чувствительные устройства — датчики, необходимые для функционирования этих систем (например, датчики обратной связи в приводах, во вторичных источниках питания и т. п.). Эти устройства, ориентированные на внутренние параметры робота, не специфичны для него в целом и не относятся к сенсорным системам робота.

По выявляемым свойствам и параметрам сенсорные системы можно разделить на следующие 3 группы:

1. Системы, дающие общую картину окружающей среды с последующим выделением отдельных объектов, значимых для выполнения роботом его функций.
2. Системы, определяющие координаты местоположения робота и параметры его движения, включая его координаты относительно объектов внешней среды и усилия взаимодействия с ними.
3. Системы, определяющие различные физико-химические свойства внешней среды и ее объектов.

К сенсорным системам первой группы относятся системы технического зрения и различного типа *локаторы*. Вторая группа сенсорных систем определяет параметры, относящиеся к самому роботу. Это измерители его географических координат в пространстве от спутниковых систем до использующих магнитное поле Земли, измерители угловых координат (гироскопы), измерители перемещения и скорости, в том числе и относительно отдельных объектов внешней среды вплоть до фиксации соприкосновения с ними и развиваемых при этом усилий. Третья группа сенсорных систем наиболее многообразна. Это измерители геометрических параметров, плотности, температуры, оптических свойств, химического состава и т. д.

В составе робота все эти сенсорные системы ориентированы на обслуживание двух исполнительных систем — манипуляционной и передвижения. Это определяет и основные требования к сенсорным системам — дальность действия, точность, быстроедействие.

Сенсорные системы, используемые в системах передвижения робота, подразделяются на системы, обеспечивающие навигацию в пространстве, и системы, обеспечивающие безопасность движения (предотвращение столкновений с препятствиями, опрокидываний на уклонах и т. п.).

Сенсорные системы, обслуживающие манипуляторы, тоже образуют две подгруппы: системы, входящие в контур управления движением манипулятора, и системы, очувствления его рабочего органа. В число последних систем часто входят размещенные у рабочего органа манипулятора системы технического зрения и измерители усилий.

По дальности действия сенсорные системы роботов можно разделить на контактные, ближнего, дальнего и сверхдальнего действия.

Контактные сенсорные системы применяются для очувствления рабочих органов манипуляторов и корпуса мобильных роботов. Они позволяют фиксировать контакт с объектами внешней среды (тактильные сенсоры), измерять усилия, возникающие в месте контакта (силомоментные сенсоры), определять проскальзывание объектов при их удержании захватным устройством. На рис. 3.31 показаны датчики силы.

Тактильные сенсоры помимо получения информации о контакте применяются и для определения размеров объектов путем их ощупывания. Эти сенсоры реализуются с помощью концевых выключателей, герметизированных магнитоуправляемых контактов на основе токопроводящей резины ("искусственная кожа") и т. п. Важным требованием, предъявляемым к этим устройствам, является высокая чувствительность (срабатывание при усилиях в единицы и десятки грамм), малые габариты, высокая механическая прочность и надежность.

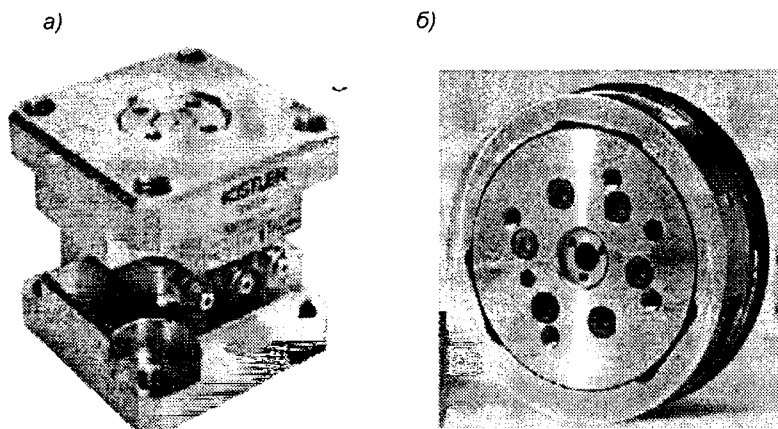


Рис. 3.31. Силовые датчики на пьезопреобразователях:
а — трехкомпонентный силомоментальный датчик силы 9328А (Kistler, Германия);
б — шестикомпонентный силомоментальный датчик Gamma (ATI, США)

Сенсорные системы *ближнего действия* обеспечивают получение информации об объектах, расположенных в непосредственной близости от рабочего органа манипулятора или корпуса робота, т. е. на расстояниях, соизмеримых с их размерами. К таким системам относятся ультразвуковые и оптические локаторы, дальномеры, дистанционные измерители плотности грунта и т. п. Такие бесконтактные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задание с большей скоростью, заранее выдавая информацию о различных объектах до соприкосновения с ними.

Сенсорные системы *дальнего действия* служат для получения информации о внешней среде в объеме всей рабочей зоны манипуляторов роботов и окружающей среды мобильных роботов.

Сенсорные системы *сверхдальнего действия* применяются главным образом в мобильных роботах. К ним относятся различные навигационные системы, локаторы и другие сенсорные системы соответствующей дальности действия. Эти устройства находят применение и в стационарных роботах при работе с подвижными объектами, чтобы заранее предвидеть их появление в рабочей зоне.

Бесконтактные сенсорные системы делятся на *активные* и *пассивные*. В первых для получения требуемой информации используются излучаемые ими специальные сигналы (оптические, радиотехнические, ультразвуковые и т. д.), а во вторых используются естественные излучения среды и ее объектов. Активные сенсорные системы имеют передатчик, излучающий первичный сигнал, и приемник, регистрирующий сигнал, отраженный от объектов среды

или прошедший через среду прямой сигнал. Пассивные системы, естественно, имеют только приемное устройство, а роль излучателя играют сами объекты внешней среды. Поэтому пассивные сенсорные системы технически обычно проще и дешевле активных, но менее универсальны. Для некоторых применений важна также скрытность действия пассивных систем. (Заметим, что все органы чувств человека являются пассивными. Однако у некоторых животных (летучие мыши, дельфины) существуют и активные сенсорные системы, когда пассивные системы и, прежде всего, зрение не обеспечивают их необходимой информацией.)

Наконец, сенсорные системы роботов можно разделить на системы с фиксированным направлением восприятия и с переменным (сканирующие).

В настоящее время для очувствления роботов наиболее широкое применение получили системы технического зрения, локационные, силомоментные и тактильные. Наиболее универсальными из них являются системы технического зрения. Развитие систем технического зрения (СТЗ) и использующих их очувствленных роботов стало одним из важных направлений современной робототехники.

СТЗ в составе систем управления роботов предназначены, наряду с другими сенсорными системами, прежде всего для реализации адаптивного управления и для обеспечения человека-оператора, управляющего роботом, видеоинформацией об окружающей робот обстановке и, прежде всего, о его рабочей зоне.

В рамках решения последней задачи СТЗ часто комплексируют с компьютерной графикой для построения динамической 3D-картины внешней среды в виде системы стилизованной виртуальной реальности, которая используется при планировании действий робота, отработки программ отдельных операций, а также при управлении ими.

Основные задачи, которые решают СТЗ:

- ☐ получение общей зрительной картины окружающей внешней среды;
- ☐ выделение в этой картине отдельных объектов и их распознавание, включая кластеризацию (разбиение на классы по близости по некоторым важным признакам), классификацию (отнесение к определенным заданным классам), верификацию (обнаружение конкретного искомого объекта);
- ☐ определение характеристик тех из выявленных объектов, которые нужны для выполнения роботом конкретных заданий.

При решении этих задач СТЗ так же часто комплексируют с другими сенсорными системами. Кроме того, как было указано ранее, СТЗ применяются для визуализации информации от других типов сенсорных систем.

СТЗ могут быть:

- ☐ одномерными (линейка), двух- и трехмерными (стерео);
- ☐ монохромными (полутоновыми, черно-белыми);
- ☐ цветными.

На рис. 3.32 показан типовой состав СТЗ: датчик (сенсор) изображения, устройство предобработки и процессор, выходная информация от которого поступает в систему управления и к человеку-оператору для дальнейшего использования.



Рис. 3.32. Схема системы технического зрения

Основной тип СТЗ — это однопроцессорные системы на базе персонального компьютера. Предобработка осуществляется специальным устройством ввода (цифровая плата с памятью изображения). Для повышения быстродействия особенно при работе с достаточно сложными изображениями переходят к многопроцессорным системам с разделением задач на подзадачи, которые можно решать параллельно. Существуют СТЗ и с последовательной (конвейерной) структурой. Они применяются для обработки больших массивов данных за длительный период времени.

В компьютерах используется цифровое изображение, которое представляет собой полученную от датчиков изображения совокупность строк и столбцов *пикселей* (pixels — сокращение слов picture element — элемент изображения), предварительно преобразованных в цифровую форму. Каждый пиксел характеризуется интенсивностью (яркостью), которая представляется числом. Обычно используют однобайтовые (8-битовые) числа, дающие числовые значения от 0 до 255, реже — 10-битовые (1024 значения).

Датчик изображения — это оптоэлектронный преобразователь (ОЭП), работающий в диапазоне видимого света. Существуют также упомянутые ранее ОЭП, работающие в других диапазонах электромагнитного излучения до видимого света (ИК и радио) и после (УФ, рентгеновское и гамма-излучения).

Преобразователь видимого света представляет собой телекамеру одного из двух типов — в виде вакуумных электронно-оптических приборов, которые исторически появились первыми, и более современных твердотельных камер на основе ячеек с зарядной связью (ПЗС) или фотозлементов (фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы).

Изображения могут получаться также и с помощью сканирующих дальнометров — локаторов лазерных, микрорадиоволновых и др.

В соответствии с указанным ранее функциональным составом в СТЗ последовательно решаются следующие задачи обработки зрительной информации:

- ☐ предварительная обработка видеоизображения, получаемого от датчика, в виде его фильтрации с целью повышения качества изображения путем освобождения от шумов и других помех, включая изменение освещенности и тени, сглаживание; повышение контрастности с усилением границ объектов и их частей, преобразование аналогового сигнала в цифровой;
- ☐ сегментация, т. е. декомпозиция изображения с последовательным выделением отдельных объектов из общей картины, затем их частей и т. д. (обнаружением контуров, участков определенной текстуры и цвета);
- ☐ определение характеристик этих объектов, т. е. выделение признаков (дескрипторов) для их последующего распознавания (выделение отрезков прямых, отверстий, округлостей, оценка величины площади и т. п.);
- ☐ распознавание, т. е. кластеризация, классификация или верификация.

Как следует из приведенного перечня, основная идея работы со зрительной информацией, включая распознавание образов, — это решение всех задач по частям: изображение разбивается на объекты, в последних выделяются отдельные части и т. д. Сперва распознаются они, затем по их совокупности — целые объекты. При этом возможно распознавание и при неполной видимости части объектов. В этом случае выдвигается и проверяется несколько гипотез. Последнее может потребовать и дополнительного осмотра объекта.

Выбор отдельных частей или признаков зависит от конкретной решаемой задачи и может быть иерархическим. (Так, например, при поиске автомашины на коллективной стоянке сперва ищется объект по цвету и марке, а окончательно, конечно, он устанавливается по номеру.)

Кластеризация и классификация осуществляются на основе методов теории принятия решений по перечню признаков внешнего вида (в n -мерном пространстве признаков). При классификации возможно еще сопоставление с эталонами (образцами), представляющими отдельные классы объектов. Эти эталоны обычно являются обобщенными геометрическими или символическими моделями, сохраняющими только необходимые для распознавания характерные признаки (стол, стул и т. п.).

Основной метод сопоставления с эталонными геометрическими моделями, как и верификации, — это совмещение структур изображения и модели (обычного по двум характерным точкам) с предварительным масштабированием и ориентацией (поворотом) изображения.

При трехмерных изображениях объектов они обычно распознаются по двумерным проекциям, а третья координата используется для определения взаимного расположения объектов. Вместе с тем существуют методы и объемного распознавания. В частности, известен метод совмещения 3D-изображений с 3D геометрическими моделями, образованными из примитивов типа цилиндр, параллелепипед и т. п. (Здесь совмещение производится уже по трем характерным точкам.)

Вычислительные методы обработки изображений развиваются уже в течение более 30 лет. Вначале использовались большие ЭВМ, затем с появлением персональных компьютеров они стали основным аппаратным обеспечением для этих методов. В настоящее время существуют десятки программ обработки изображений и распознавания образов — лиц, отпечатков пальцев, рукописных текстов, номеров автомашин, штрих-кодов и пр. Многие из них работают в реальном масштабе времени. Как правило, все они предполагают предварительный этап обучения (с учителем или самообучение) [3].

Наряду с перечисленными задачами в СТЗ конкретного назначения могут решаться еще и различные сопутствующие задачи. К ним, прежде всего, относятся сжатие информации и ее хранение. Что касается последнего, то для решения задачи распознавания необходима база данных для изображений эталонов и прототипов, классифицированных по характерным геометрическим и словесным признакам.

Заметим, что большинство способов и приемов обработки изображений в СТЗ аналогичны существующим в живой природе и подсказаны физиологами и психологами.

По мере усложнения задач, решаемых робототехническими системами, соответственно увеличивается и количество сенсорных систем. При этом отдельные сенсорные системы могут использоваться как для решения не связанных друг с другом автономных задач, так и комплексироваться для решения общих задач. Последний вариант, очевидно, является наиболее сложным алгоритмически, поскольку требует системного подхода к совместному функционированию нескольких сенсорных систем. Простейшие примеры такого комплексирования — это дополнение системы технического зрения каким-либо дальномером для получения с требуемой точностью информации о дальности или совместное использование получаемой от соответствующих сенсорных систем информации о положении рабочего органа манипулятора и об усилии, с которым он воздействует на объекты внешней среды. Последнее необходимо при выполнении технологических операций, требующих позиционно-силового управления манипулятором (шлифовка поверхности и т. п.).

Конструктивно сенсорные устройства размещают на рабочих органах манипуляторов, на корпусе робота или вне робота. На рис. 3.33 показан пример оучувствленного манипулятора.

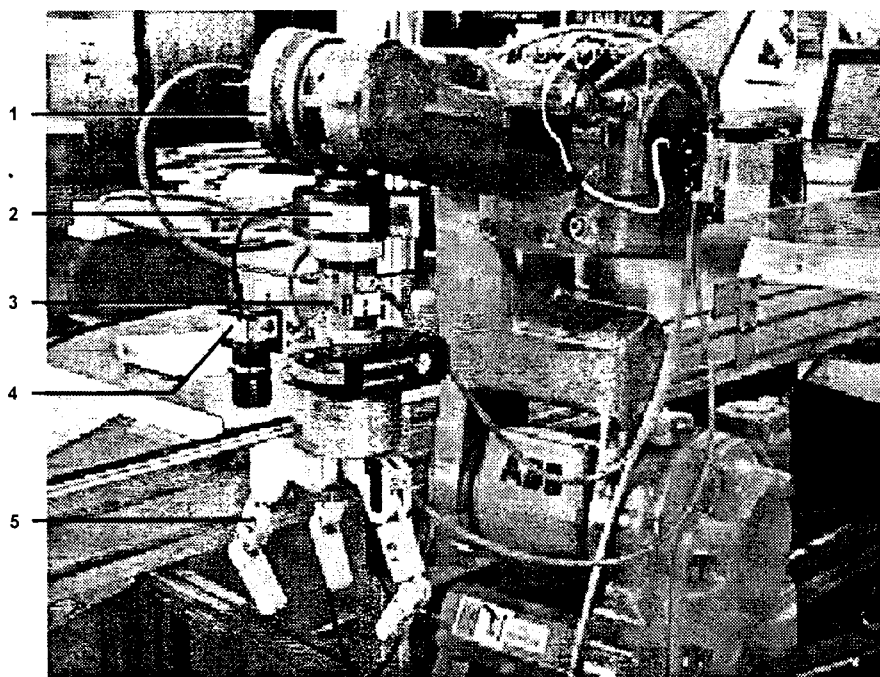


Рис. 3.33. Очувствленный схват: 1 — манипулятор; 2 — силомоментный датчик; 3 — замок; 4 — видеокамера; 5 — трехпальцевый схват (ABB, Швейцария)

3.6. Способы и устройства управления робототехническими системами

В робототехнике существуют три задачи управления: управление манипуляторами, системой передвижения и совместное управление группой роботов. Применяемые для решения этих задач способы управления можно классифицировать следующим образом.

- ☐ По степени участия человека в процессе управления существуют системы: автоматического, автоматизированного и ручного управления.
- ☐ По типу алгоритма автоматического управления различают системы: программного, адаптивного и интеллектуального управления.
- ☐ По типу движения существуют системы управления: непрерывные (контурные), дискретные позиционные (шагами "от точки к точке") и дискретные цикловые (с одним шагом по каждой координате).

(В отечественной литературе дискретное позиционное управление часто называется просто позиционным.)

- По виду управляемых переменных различают системы управления: положением (позицией), скоростью и силой (моментом).

Перечисленные способы управления часто применяются в комбинации — разные способы по разным координатам или путем последовательного перехода от одного способа управления к другому.

Реализуются аппаратно перечисленные способы управления устройствами управления.

Устройство управления робота осуществляет автоматическое управление его исполнительными системами — манипуляционными и передвижения, образуя в совокупности с ними как объектами управления систему автоматического управления робота. Кроме того, устройства управления роботами часто используют и для управления различными другими объектами (технологическим оборудованием, транспортными устройствами и т. п.), которые работают совместно с роботом, образуя с ним единый технологический комплекс, а также для связи с человеком-оператором, в т. ч. для осуществления процесса управления. Для последнего в устройствах управления могут быть предусмотрены различные средства такого управления. Типовым таким средством являются задающие рукоятки (джойстики). Оператор, смещая трехстепенную задающую рукоятку с нейтрального положения, задает с помощью ее датчиков по отдельным степеням подвижности составляющие вектора перемещения или скорости рабочего органа управляемого манипулятора. По этим данным вычислительное устройство рассчитывает задания для приводов манипулятора, которые обеспечивают требуемое перемещение рабочего органа. Таким образом, компактная задающая рукоятка с вычислительным устройством заменяет достаточно громоздкий задающий манипулятор в предыдущей системе управления. Аналогичным образом с помощью другой трехстепенной задающей рукоятки осуществляется управление ориентацией рабочего органа. Существуют задающие рукоятки с большим числом степеней подвижности — до шести, которые позволяют заменить две трехстепенные рукоятки одной.

Еще более удобными для операторов способами управления манипуляторами являются супервизорное и интерактивное. Эти способы применяются для управления манипуляторами, имеющими систему автоматического управления. Они будут рассмотрены в главе 10.

Описанные способы управления манипуляторами применяются и для управления системами передвижения мобильных роботов и различных видов транспортных средств, которыми занимается робототехника (см. параграф 3.4).

Устройства управления могут быть индивидуальными, входящими в состав каждого робота, и групповыми, управляющими несколькими роботами. Конструктивно индивидуальные устройства управления выполняют обычно отдельно от механической части робота (см., например, рис. 3.5), значительно

реже в общем корпусе, а у мобильных роботов обычно такое устройство состоит из 2 частей — бортовой и входящей в состав пульта оператора (или в дополнение к нему).

подавляющее большинство роботов имеет электронные устройства управления, выполненные на микропроцессорной базе. Однако существуют и неэлектрические устройства управления роботов, чаще всего реализуемые на пневмонике и предназначенные для применения в особых взрыво- и жароопасных условиях. Управлению роботами посвящены главы 6—12.

3.7. Особенности устройства других средств робототехники

Как уже отмечалось, предметом робототехники наряду с роботами является также ряд близких роботам технических устройств. К ним, в частности, относятся рассмотренные ранее различные автоматические транспортные средства и неавтоматические манипуляторы. Последние включают, в частности, управляемые оператором сбалансированные манипуляторы, которые широко применяются на погрузочно-разгрузочных операциях. На рис. 3.34—3.36 показаны типовые конструкции таких манипуляторов. В большинстве случаев они имеют шарнирную кинематику. В сбалансированных манипуляторах осуществлено автоматическое уравнивание (балансировка) груза аналогично тому, как это часто делается и в манипуляторах роботов. Благодаря этому оператор с помощью рукоятки, укрепленной у захватного устройства манипулятора, без усилия может перемещать взятый груз в рабочей зоне манипулятора.

На рис. 3.34 показан сбалансированный манипулятор грузоподъемностью 150 кг. На колонке 1 на поворотном устройстве 2 расположена приводная головка 3 с электроприводом поворота в вертикальной плоскости звена 4. Звено 4 включает пантограф, который обеспечивает сохранение вертикального положения звена 5 при поворотах звена 4 в вертикальной плоскости. На конце звена 5 установлены поворотная головка 6 с рукояткой управления 7, захват 8 и закрепленное в нем сменное захватное устройство 9. Рычажная система манипулятора сбалансирована с помощью пружинного устройства, расположенного в приводной головке 3. Оператор управляет манипулятором с помощью рукоятки 7. При ее повороте вверх привод перемещает захватное устройство вверх, а при повороте вниз — соответственно вниз. Скорость перемещения при этом пропорциональна величине поворота рукоятки. При нейтральном положении рукоятки захватное устройство останавливается и удерживается в этом положении. В горизонтальной плоскости манипулятор перемещается за счет мускульной силы оператора. Однако усилие здесь требуется небольшое — только на преодоление силы трения и инерции.

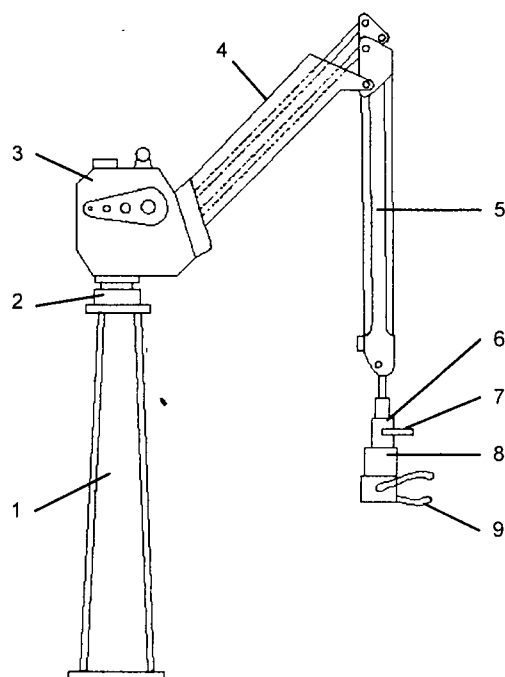


Рис. 3.34. Электромеханический сбалансированный манипулятор

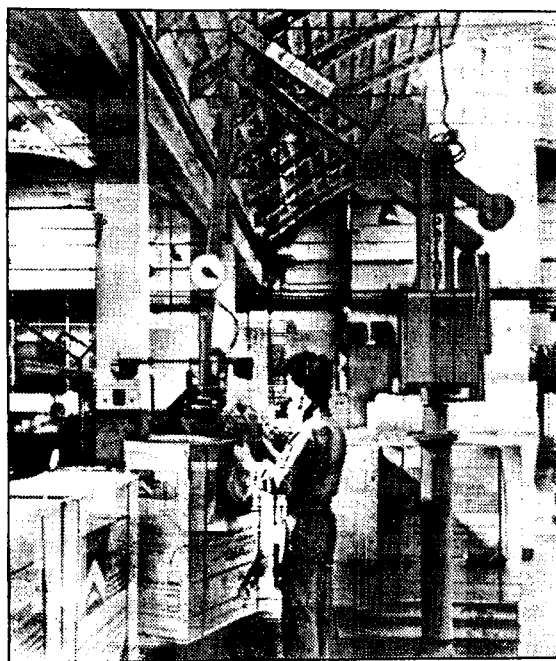


Рис. 3.35. Пневматический сбалансированный манипулятор

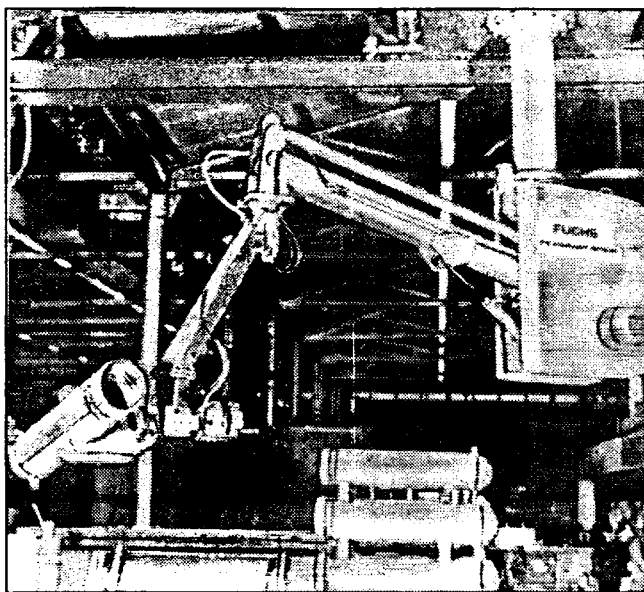


Рис. 3.36. Гидравлический сбалансированный манипулятор

Сбалансированные манипуляторы проще и значительно дешевле роботов. Хотя они не высвобождают рабочих подобно роботам, но позволяют ликвидировать тяжелый ручной труд.

Грузоподъемность сбалансированных манипуляторов — до нескольких тонн. Манипуляторы грузоподъемностью свыше 250 кг имеют гидравлический привод, при грузоподъемности 100—250 кг — электрический, при меньшей грузоподъемности — пневматический привод.

Более совершенными манипуляторами, управляемыми человеком-оператором, являются копирующие манипуляторы (см. рис. 1.4). Управление копирующим манипулятором осуществляется с помощью кинематически подобного ему задающего манипулятора, у которого на месте рабочего органа находится рукоятка. Оператор своей рукой перемещает эту рукоятку, а копирующий манипулятор при этом повторяет, копирует движения всех звеньев задающего манипулятора, который упомянут в предыдущем параграфе.

Следующий способ управления человеком-оператором — это описанное выше управление с помощью задающей рукоятки вместо задающего манипулятора.

ГЛАВА 4

ПРИВОДЫ РОБОТОВ

4.1. Классификация приводов

Привод, как известно, включает двигатель и устройство управления им. Кроме того, в его состав могут входить различные механизмы для передачи и преобразования движения (редукторы, преобразователи вращательного движения в поступательное и наоборот), тормоз и муфта.

К приводам, применяемым в роботах, предъявляют весьма жесткие специфические требования. В связи с необходимостью встраивания приводов в исполнительные системы робота — в манипуляционные и передвижения — габариты и масса приводов должны быть минимальными. Приводы в роботах работают в неустановившихся режимах и с переменной нагрузкой. При этом переходные процессы в них должны быть практически неколебательными. Важными параметрами приводов роботов являются также надежность, стоимость, удобство эксплуатации. Запросы, предъявляемые к их способу управления, быстродействию и точности, определяются соответствующими требованиями к роботу в целом, рассмотренными в *параграфе 3.1*.

В роботах нашли применение практически все известные типы приводов — электрические, гидравлические и пневматические, с поступательным и вращательным движением, регулируемые (по положению и скорости) и нерегулируемые непрерывного и дискретного действия.

На рис. 4.1 приведена типовая схема позиционного привода манипулятора. Наряду с общей обратной связью по положению в схеме имеется обратная связь по скорости, которая играет роль корректирующей гибкой обратной связи и может, кроме того, служить для управления скоростью. В тех случаях, когда механизм М является редуктором и понижает скорость, датчик скорости выгоднее ставить не как показано на схеме, а на выходе двигателя пе-

ред механизмом, чтобы увеличить величину сигнала по скорости. Устройство управления может быть непрерывного действия, релейным, импульсивным или цифровым.

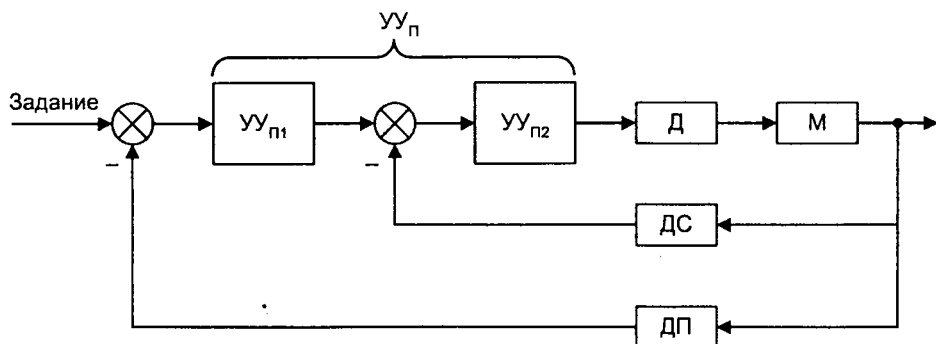


Рис. 4.1. Типовая схема позиционного привода манипуляторов: Д — двигатель; М — механизм передачи и преобразования перемещения; ДП, ДС — датчики положения и скорости; $УУ_{п1}$, $УУ_{п2}$ — составные части устройства управления $УУ_п$

Применение *пневматических приводов* в робототехнике объясняется их дешевизной, простотой и соответственно надежностью. Правда, эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном в приводах с простым цикловым управлением грузоподъемностью до 10 кг, реже 20 кг.

Гидравлические приводы наиболее сложны и дороги по сравнению с пневматическими и электрическими. Однако при мощности 2000 Вт и выше они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками и поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов. Гидравлические приводы имеют хорошее быстродействие и точность, поэтому они нашли также применение и в роботах средней грузоподъемности, когда требуются высококачественные динамические характеристики.

Электрический привод, несмотря на его хорошую управляемость, простоту подвода энергии, высокий к.п.д., имеет худшие массогабаритные характеристики, чем пневматический и гидравлический приводы. Прогрессивное увеличение в последние годы доли электромеханических роботов в общем парке роботов в мире вызвано быстрым прогрессом в совершенствовании электрических двигателей, специально созданных для роботов. Основная область применения электрических приводов в робототехнике — это роботы средней грузоподъемности (десятки килограмм), легкие роботы с высококачественным управлением и мобильные роботы.

Для иллюстрации сказанного на рис. 4.2 приведены обобщенные сравнительные характеристики различных типов приводов по удельной мощности. (При

расчете удельной мощности пневмоприводов учитывалась масса аппаратуры подготовки воздуха (см. параграф 4.2), а гидроприводов — масса гидростанции (см. параграф 4.3), которые входят в конструкцию роботов.)

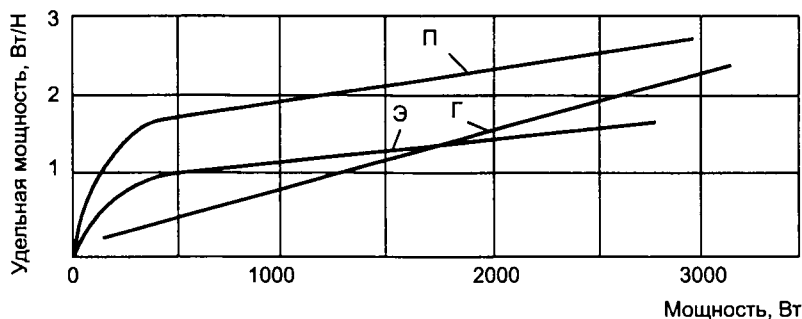


Рис. 4.2. Удельная мощность (отнесенная к весу) электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов в зависимости от их абсолютной мощности

4.2. Пневматические приводы

В пневмопривод входят двигатель, распределительное устройство и регулятор скорости. Двигатель может быть поступательного движения — *пневмоцилиндр* и *поворотный*. Пневмоцилиндр состоит из гильзы, выполненной из прецизионной трубы обычно с фторопластовой накладкой внутри, поршня с уплотнением, которое имеет малое трение по фторопласту, и штока. К пневмоцилиндру часто пристроен тормоз, включающийся в конце хода поршня. Поршень со штоком, который присоединен к нагрузке двигателя, движется под действием сжатого воздуха, подаваемого в полость цилиндра с одной стороны поршня. Полость, расположенная с другой стороны поршня, соединяется при этом с атмосферой для выпуска воздуха, сжимаемого движущимся поршнем. Направление движения поршня со штоком зависит от того, с какой стороны от поршня подается сжатый воздух.

Применяемые в роботах поворотные пневматические двигатели имеют ограниченный угол поворота (неполноповоротные двигатели). Их подвижная часть представляет собой лопасть, укрепленную на выходном валу и расположенную в кольцеобразном корпусе. Внутри корпуса имеется перегородка, с двух сторон которой получают полости для воздуха, разделенные подвижной лопастью.

Распределительное устройство пневмопривода служит для управления подачей воздуха в двигатель. Выполняют его из золотников или клапанов обычно с электромагнитным приводом, управляющие сигналы на которые поступают от устройства управления робота.

Регулятор скорости поддерживает заданную скорость движения привода путем стабилизации расхода воздуха, подаваемого в двигатель (например, с помощью дросселя с обратным клапаном).

Пневматические двигатели работают на сжатом воздухе давлением 0,3—0,6 МПа. Сжатый воздух поступает на приводы от общего блока питания, который состоит из аппаратуры подготовки воздуха и редуктора. Подготовка воздуха заключается в его очистке от влаги и других примесей и внесении распыленного масла для смазки трущихся поверхностей в двигателе. Редуктор обеспечивает поддержание определенного давления воздуха на входе привода.

Сжатый воздух на вход блока питания поступает обычно из общей пневмосети, в которую он подается от компрессора (компрессорной станции). В мобильных роботах воздух поступает из баллонов, в которых он находится под повышенным давлением.

Как было указано, в настоящее время подавляющее большинство пневмоприводов роботов имеют простейшее цикловое управление. Привод перемещается из начального положения сразу в конечное, которое определяется механическим упором, установленным на подвижной части привода (на штоке пневмоцилиндра или выходном валу поворотного двигателя). Упор находит на демпфер, который гасит энергию движения, обеспечивая безударное торможение привода. Одновременно с этим прекращается подача воздуха в двигатель. Демпферы в основном гидравлические, а для маломощных приводов — более простые пружинные. Прибегают также к способу торможения противодавлением, при котором демпфер не требуется, а торможение происходит за счет переключения подачи воздуха в момент торможения из одной полости двигателя в другую, выхлопную полость, т. е. встречно движению поршня (или лопасти в поворотном двигателе).

Задание величины перемещения осуществляется перестановкой упора. Благодаря тому, что конечное положение двигателя определяется механическим упором, приводы с цикловым управлением имеют значительно более высокую точность, чем при обычном позиционном управлении с обратной связью по положению (погрешность менее 0,1 мм) и повышенное быстродействие (скорость перемещения — несколько метров в секунду).

Разработаны конструкции пневмоприводов так же и с несколькими выдвижными упорами, которые последовательно по программе выставляются на пути упора, укрепленного на подвижной части двигателя. В результате осуществляются торможение и позиционирование привода в промежуточных точках, определяемых положением этих выдвижных упоров. Такой способ позиционирования может быть реализован, например, с помощью размещенного вдоль пневмоцилиндра барабана с упорами. Упоры расположены по длине барабана со смещением относительно друг друга по углу как бы по

винтовой линии. В результате при повороте барабана на пути упора, перемещающегося со штоком двигателя, последовательно оказываются упоры барабана от первого до последнего. Движение барабана, естественно, должно быть синхронизировано с движением штока двигателя. Существуют также конструкции подобных приводов с выдвижными упорами, снабженными индивидуальными приводами.

На рис. 4.3 показан внешний вид пневмоприводов.

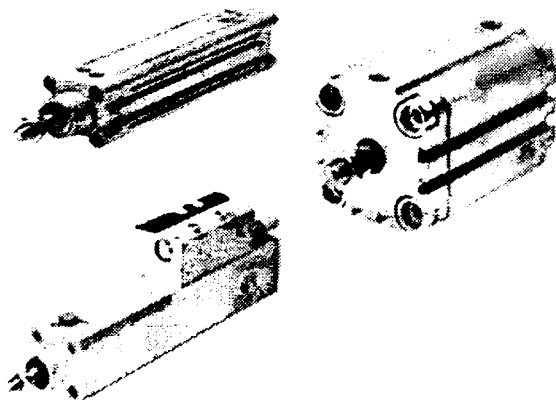


Рис. 4.3. Пневмоцилиндры (FESTO, Германия)

Принципиально возможно позиционирование пневмоприводов с помощью позиционного управления с обратной связью по положению. Однако из-за сжимаемости воздуха такое управление имеет значительно худшую точность, чем при использовании упоров. Другим вариантом дискретного позиционного пневмопривода является дискретный привод, состоящий из последовательно соединенных цикловых пневмоприводов с различающимися (вдвое) значениями перемещения. Включая эти цикловые приводы в разной комбинации, можно получать соответственно разное суммарное перемещение из конечного числа его дискретных значений. Например, 3 таких привода дают в совокупности 8 точек позиционирования, 4 привода — 16 точек и т. д.

На рис. 4.4 показан один из первых отечественных серийных пневматических промышленных роботов МП-9С, а на рис. 4.5 — его пневматическая схема. Робот получил широкое применение на сборочных операциях и для обслуживания прессов.

Сжатый воздух из пневмосети поступает через запорный муфтовый вентиль 1, влагоотделитель 2, регулятор давления 3 и маслораспылитель 5 к электропневматическим нормально закрытым клапанам 7—13. Давление в системе контролируется с помощью технического манометра 4.

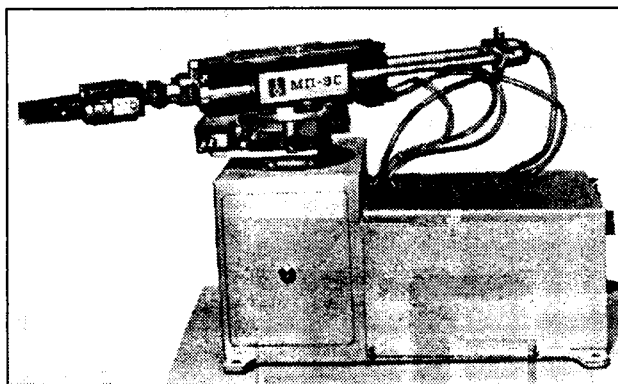


Рис. 4.4. Пневматический промышленный робот МП-9С (ЦНИИ РТК, Россия)

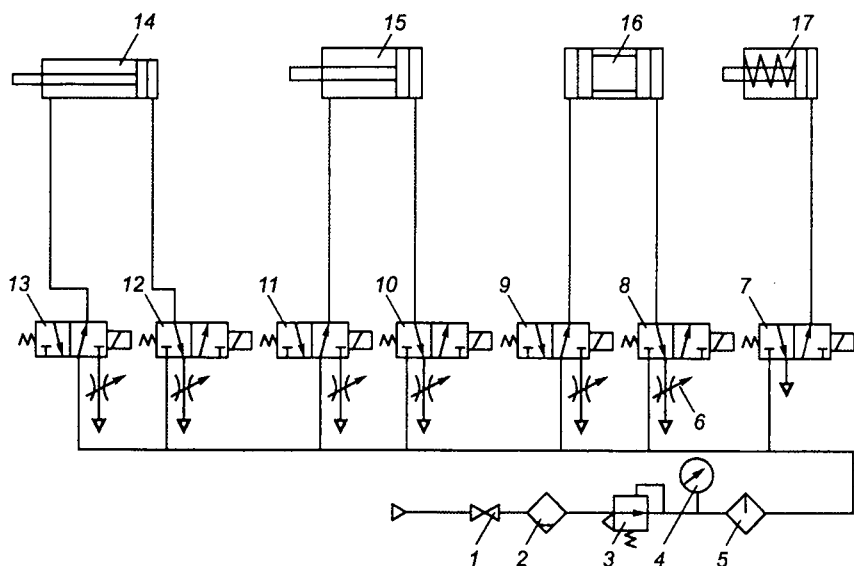


Рис. 4.5. Пневматическая схема робота МП-9С

При включении клапана 7 воздух поступает в пневмоцилиндр 17 схвата. Пальцы схвата сближаются и зажимают объект. При отключении клапана 7 воздух из пневмоцилиндра 17 стравливается в атмосферу и поршень под действием пружины возвращается в исходное положение. При включении клапанов 8, 10, 12 воздух поступает соответственно к пневмоцилиндрам поворота манипулятора подъема манипулятора и выдвижения схвата, а через клапаны 9, 11, 13 и дроссели 6 стравливается в атмосферу. С помощью этих дросселей регулируется скорость поршней пневмоцилиндров и, соответственно, звеньев манипуляторов.

4.3. Гидравлические приводы

Как было отмечено в параграфе 4.1, гидроприводы нашли основное применение в роботах большой грузоподъемности, а также в роботах средней грузоподъемности, когда требуется особо качественное управление. Гидропривод состоит из тех же основных частей, что и пневмопривод. Основой его является двигатель поступательного движения (гидроцилиндр) или углового движения (поворотный гидродвигатель), которые устроены подобно аналогичным пневматическим двигателям, только вместо сжатого воздуха в них используется жидкость (обычно масло) под давлением до 20 МПа. Соответственно с большим давлением по сравнению с пневмоприводом создается и на 2 порядка большее усилие. Несжимаемость жидкости обеспечивает при этом гидроприводам значительно лучшие динамические и точностные характеристики, чем у пневмоприводов.

Управление гидравлическими двигателями осуществляется с помощью золотников и клапанов, которые имеют обычно электрическое управление, т. е. представляют собой электрогидравлические усилители (ЭГУ). Гидроприводы чаще всего имеют непрерывное управление.

В отличие от пневмоприводов гидроприводы имеют свой блок питания, входящий в состав робота. Этот блок состоит из гидронасоса, фильтра, регулятора давления, устройства охлаждения (обычно водяного) и масляного аккумулятора с запасом масла.

На рис. 4.6 показаны гидравлические приводы, а на рис. 4.7 — пример гидравлического промышленного робота. Робот состоит из трех частей: манипулятора, насосной станции (слева) и устройства управления (в центре).

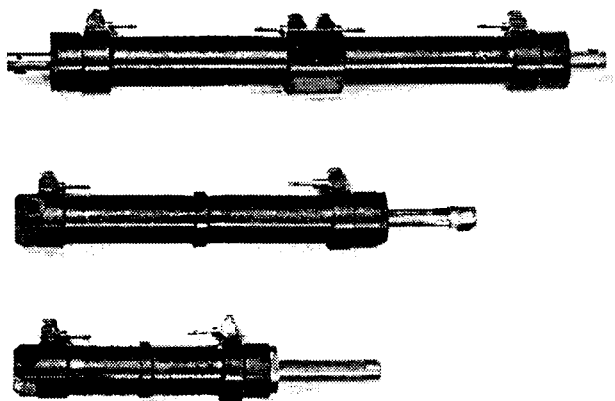


Рис. 4.6. Гидроцилиндры (Escort, Россия)

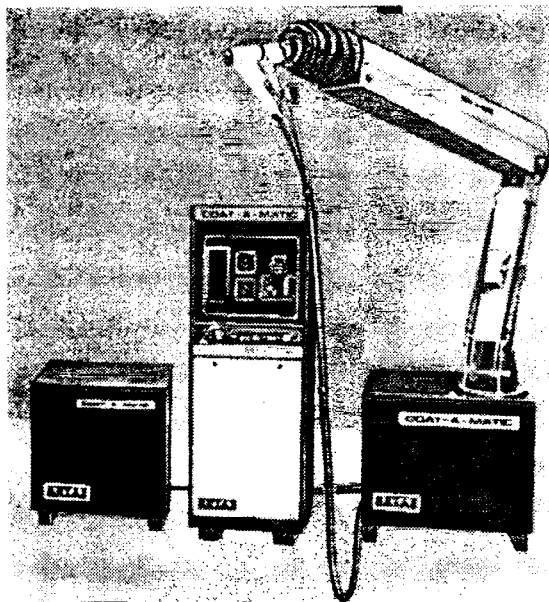


Рис. 4.7. Гидравлический промышленный робот для нанесения покрытий краскораспылителем Coat-a-matrix (Retab, Швеция)

4.4. Электрические приводы

В настоящее время, как было отмечено, это самые распространенные в робототехнике приводы. В роботах применяются электроприводы следующих типов:

- ☐ на двигателях постоянного тока — традиционных коллекторных и бесколлекторных (вентильных);
- ☐ на асинхронных двигателях с частотным управлением и нерегулируемых (с цикловым управлением);
- ☐ на шаговых двигателях;
- ☐ на основе различного типа регулируемых муфт в сочетании с нерегулируемым асинхронным двигателем или двигателем постоянного тока;
- ☐ на основе электромагнитов (соленоидных и других типов).

В основном применяются электроприводы с угловым перемещением, т. е. вращающиеся. Однако в звеньях манипуляторов с поступательным перемещением наряду с вращающимися двигателями в комбинации с механизмами, преобразующими вращательное движение в поступательное, нашли применение и специальные линейные приводы.

Электроприводы для роботов в общем случае включают электродвигатель, снабженный датчиками обратной связи по положению и скорости, механическую передачу, часто тормоз, иногда муфту (например, для защиты двигателя от перегрузки) и устройство управления.

Перспективными типами электрических приводов для роботов стали высокомоментные безредукторные двигатели, приводы с непосредственным цифровым управлением, а также бездатчиковые приводы с вычислителями значений перемещения и скорости по измеряемым электрическим переменным двигателя. Примеры электромеханических промышленных роботов были приведены на рис. 3.6 и 3.8.

4.5. Рекуперация энергии в приводах

Приводы роботов работают в основном в переходных режимах типа разгон-торможение. Поэтому одним из способов экономии энергии у них может служить использование идеи *рекуперации энергии*. Это особенно важно для мобильных роботов с автономным энергопитанием. Кроме того, при этом часто повышается и быстродействие. Рекуперация энергии основана на ее запасании в процессе торможения и отдачи при последующем разгоне. Существуют два основных способа такого запасаания энергии: запасаение механической энергии (с помощью маховиков, пружин) и электрической (в аккумуляторах, конденсаторах, индукционных катушках).

В цикловых промышленных роботах получил применение принцип рекуперации механической энергии с помощью пружин, который будет рассмотрен в *параграфе 6.4*.

На рис. 4.8 приведена схема электрического привода с рекуперацией электрической энергии [4]. Энергия, которая возвращается в источники питания в режиме рекуперативного торможения, запасается в индуктивности L . Ключи K_2, K_4 предназначены для реверсного управления двигателем от двухполюсного источника E_1, E_2 , а ключи K_1, K_3, K_5, K_6 — для осуществления режима рекуперации. В режиме движения под действием двигателя D ключи K_1 и K_4 замкнуты, а ключи K_3 и K_5 разомкнуты. Режим рекуперации включается при торможении, когда знаки производной от заданной скорости и скорости двигателя разные. Для этого устройство управления размыкает ключи K_1 и K_6 , замыкает K_3, K_5 и инвертирует K_2 и K_4 . Аналогичные схемы разработаны и с использованием в качестве накопителей энергии конденсаторов.

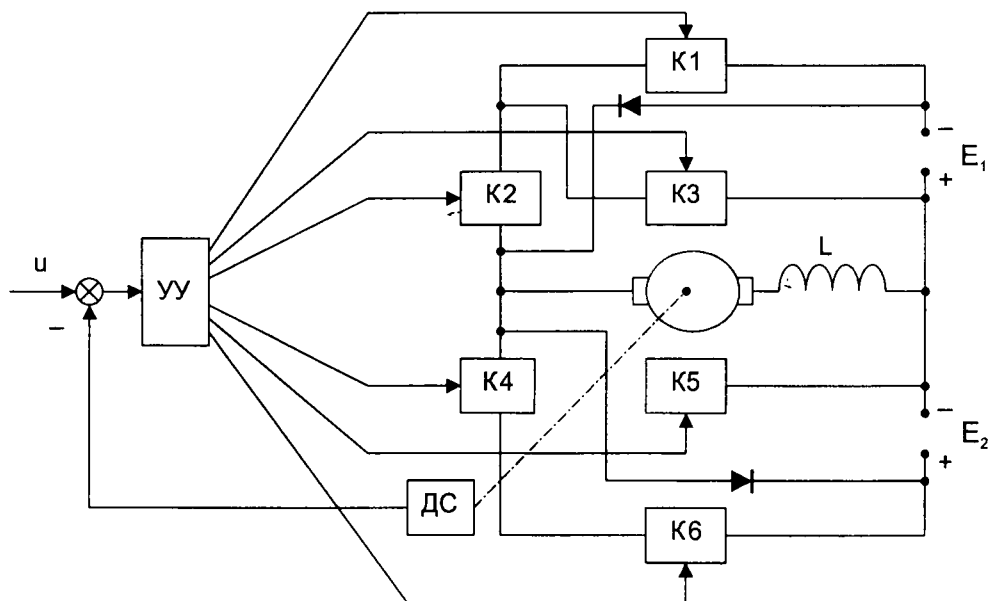


Рис. 4.8. Схема системы управления приводом мобильного робота с рекуперацией энергии:

Д — двигатель; E_1 , E_2 — источники напряжения постоянного тока;

УУ — устройство управления; ДС — датчик скорости; К — ключи; L — индуктивность

4.6. Искусственные мышцы

Перспективным бионическим направлением в робототехнике является создание приводов типа искусственная (техническая) мышца. Современные приводы, в том числе и применяемые в робототехнике, по своим массогабаритным параметрам на порядок уступают поперечно-полосатым мышцам животных и человека (см. главу 2). То, что параметры приводов в значительной степени определяют массогабаритные и энергетические характеристики роботов в целом, определяет интерес к проблеме создания технических аналогов таких мышц.

Одна из очевидных причин значительно большей массы у современных приводов по сравнению с мышцами — наличие в них металлов, особенно ферромагнитных в электрических двигателях. Поэтому первыми разработками приводов, получивших название искусственная мышца, были пневматические приводы, в которых цилиндр с поршнем заменялся эластичной трубкой (резина, полимеры) в оплетке крест-накрест (нейлон). При подаче в трубку воздуха под давлением она, раздуваясь, сокращается примерно на треть длины, имитируя работу мышцы. Такие приводы имеют в 3—4 раза меньшую массу, чем пневматические цилиндры той же мощности, и поэтому они на-

шли применение, прежде всего, в протезах конечностей. Источником сжатого газа при этом служат обычно одноразовые баллончики.

На рис. 4.9 показан пример такого реверсивного привода.

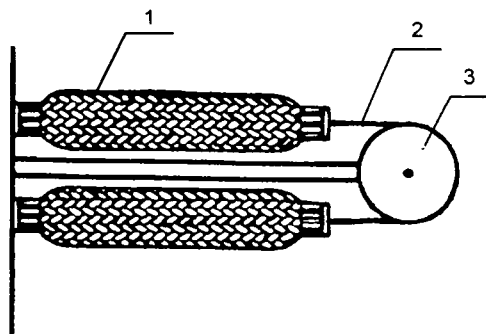


Рис. 4.9. Реверсивный гибкий пневматический привод: 1 — пневматический привод; 2 — трос; 3 — блок (Bridgstone, Япония)

Устройство состоит из двух пневматических приводов одностороннего действия. При повышении давления в одном из них и одновременном понижении на ту же величину в другом первый привод сокращается, удлиняя второй. В результате через трос происходит поворот блока, который связан со звеном манипулятора. Выполненный на таких приводах пятиступенной манипулятор робота Softarm имеет грузоподъемность 3 кг при массе 5,5 кг и погрешность позиционирования — 1,5 мм.

Разновидностью пневматических искусственных мышц являются аналогичные устройства с заменой оплетки продольными тяговыми нитями. Такие конструкции имеют несколько лучшие тяговые характеристики и развивают большие усилия. Еще бóльшие тяговые усилия можно получить при замене газа жидкостью под давлением, т. е. при переходе к гидравлическим искусственным мышцам. Такие гидравлические искусственные мышцы обладают также более высокой точностью позиционирования и лучшей динамикой, как все гидравлические приводы по сравнению с пневматическими.

В среднем описанные пневматические и аналогичные гидравлические искусственные мышцы по сравнению с традиционными приводами (цилиндрами) в 3 раза легче, в 2 раза меньше по габаритам и развивают в десятки раз большее усилие на единицу веса.

В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования и разработки искусственных мышц, основанных на других физических принципах. Наиболее близки к рассмотренным устройствам разработки электромагнитных и электростатических искусственных мышц.

Электромагнитная искусственная мышца состоит из многовитковой обмотки, сжатой в жгут, в котором проводники с электрическим током противоположного направления прижаты друг к другу. При пропускании по ним тока они вследствие электромагнитного силового взаимодействия расходятся в поперечном направлении. В результате длина жгута сокращается подобно сокращению пневматических и гидравлических мышц.

Один из первых вариантов электростатической искусственной мышцы представляет собой цилиндр, по оси которого расположен центральный электрод, а по образующим цилиндра — соединенные друг с другом гибкие периферийные электроды. При подаче на центральный и периферийный электроды электрического потенциала возникает электрическая сила, которая отталкивает периферийные электроды от центрального. В результате периферийные электроды изгибаются, вызывая сокращение мышцы. Другой вариант электростатической мышцы выполнен в виде столбика, собранного из тонких металлических дисков (пленок), разделенных упругими изолирующими прокладками. Все нечетные и все четные диски соединены. При подаче на них электрического напряжения разной полярности диски сближаются, сжимая изолирующие прокладки, и мышца сокращается.

Значительные успехи достигнуты в разработке электростатических искусственных мышц из электроактивных полимеров, деформирующихся в электрическом поле. Так, силиконовые и акриловые пластины толщиной в десятки микрометров (мкм) под действием напряжения в несколько киловольт (кВ) расширяются перпендикулярно полю в 2—3 раза, создавая усилия в десятки ньютонов (Н). Линейный привод типа искусственная мышца, выполненный из такой пленки, покрытый с двух сторон эластичными электродами, представляет собой цилиндрическую пружину. При приложении к пленке электрического напряжения цилиндр удлиняется.

Аналогичные приводы создаются и на основе ионных полимеров, и полимерно-металлических композитных материалов. В электрическом поле молекулы этих материалов ионизируются и испытывают механические силы, которые вызывают деформацию материала в направлении, перпендикулярном градиенту электрического поля. На этом принципе был создан, в частности, пятипальцевый схват для манипуляторов [5].

Разрабатываются также искусственные мышцы на базе различных искусственных волокон, деформируемых под действием химических реагентов, однако для всех них характерно низкое быстродействие (секунды) и величины хода (деформации) не более 10—15 %.

4.7. Микроприводы

Развитие микроробототехники в первую очередь потребовало создания соответствующих микроприводов. Для этого наряду с миниатюризацией традиционных двигателей разрабатываются совершенно новые приводы для микроперемещений, основанные на использовании управляемых гибких деформаций (см. рис. 3.11). Одним из таких перспективных типов микроприводов являются *пьезоприводы*. На рис. 4.10, а показана схема основного элемента такого привода — пьезопреобразователя электрической энергии в энергию механического перемещения [6]. Он представляет собой пакет из пьезокерамических шайб 1 с нанесенными на торцы электродами. При подаче на них электрического напряжения за счет обратного пьезоэлектрического эффекта происходит увеличение или уменьшение толщины шайб в зависимости от полярности приложенного напряжения. На рис. 4.10, б показан другой тип таких преобразователей, основанный на изгибных деформациях многослойных пьезоэлектрических пластин. Такие преобразователи имеют больший ход, чем использующие деформацию расширения-сжатия, но худшие точностные и силовые характеристики.

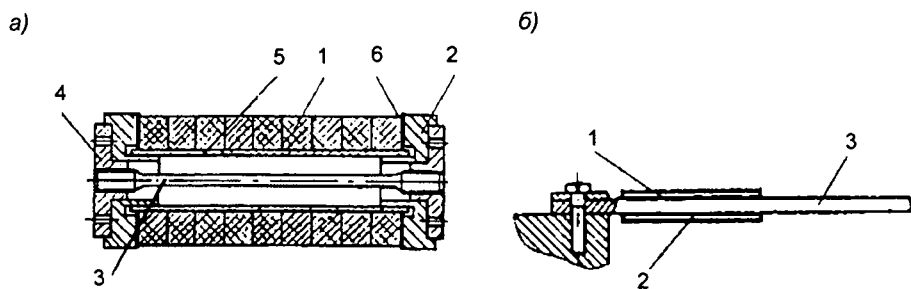


Рис. 4.10. Пьезоэлектрические преобразователи микроприводов: а — с поступательной деформацией растяжение-сжатие: 1 — пьезокерамические шайбы; 2 — фланец; 3 — шпилька; 4 — гайка; 5 — пластмассовая втулка; 6 — слюдяная шайба; б — с изгибной деформацией: 1, 2 — пьезоэлектрические пластины; 3 — металлическая рессора

Величина перемещения на выходе таких электромеханических преобразователей (ход) — десятые доли миллиметров; скорость — до 2 м/с, погрешность управляемого позиционирования — доли микрометров, усилие — сотни ньютонов, мощность — десятки ватт. Из таких преобразователей создаются трехступенные микроманипуляционные системы. Они часто комбинируются с обычными электромеханическими манипуляционными системами. Последние обеспечивают перемещение в десятки миллиметров с погрешностью, перекрываемой микроманипуляционной системой. Получается манипулятор, состоящий из последовательно соединенных систем грубого и точного пози-

ционирования, рабочий ход которого определяется первой системой, а точность — второй.

Помимо пьезоэлектрических существуют микроприводы, основанные на других принципах действия — пьезомагнитные, электро- и магнитострикционные, биметаллические, на эффекте памяти формы, электростатические. Принцип действия некоторых из них описан в *параграфе 4.6* [6].

Для мобильных микророботов, предназначенных для передвижения в узких полостях (трубопроводы, желудочно-кишечный тракт и кровеносные сосуды человека и т. п.), разработаны специальные микродвижители, реализующие способ передвижения, подобный используемому гусеницами и червями. Подобная система передвижения на пьезоприводах состоит из нескольких пьезоэлектрических сегментов, соединенных центральным стержнем из того же материала. Поступательное перемещение осуществляется путем удлинения центрального стержня, а поперечно расширяющиеся за счет пьезоэффекта сегменты выполняют функции фиксаторов. Частота импульсов движения: 10—20 МГц.

Существуют аналогичные системы, основанные на пневматике. На переднем и заднем концах такого микроробота имеются пневмофиксаторы, которые попеременно закрепляются на стенках полости. Корпус робота попеременно удлиняется при закреплённом заднем и сокращается при закреплённом переднем концах.

Основные уже определившиеся области применения микроприводов и основанных на них микроманипуляторов и микророботов — это технологические микрооперации в промышленности (сборка, микрообработка, сварка и т. п.), биологические и фармакологические технологии, медицина (осмотр внутренних полостей, доставка туда лекарств, хирургические операции).

ГЛАВА 5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОБОТОВ

5.1. Основные принципы организации движения роботов

Робот и другие средства робототехники — это типичные динамические системы, работающие в основном в неустановившихся режимах. С точки зрения математического описания и аналитического изучения они представляют большие трудности в силу значительного числа степеней подвижности, нестационарности, нелинейностей и высокого порядка описывающих их уравнений. Поэтому основными методами изучения и проектирования роботов являются компьютерное моделирование и физический эксперимент.

Прежде чем приступить к математическому описанию роботов, рассмотрим общие принципы, которыми следует руководствоваться при оценке и синтезе их динамических характеристик. Для большей определенности сделаем это применительно к наиболее сложной части роботов — манипуляторам.

1. Принцип соответствия свободных и вынужденных движений. Свободные движения должны быть максимально согласованы с вынужденными (требуемыми). Иными словами, механическую часть и приводы следует выбирать исходя из типовых движений, которые должен совершать манипулятор, чтобы его управляемые движения реализовывались наиболее экономно и при этом обеспечивалось высокое качество управления. Например, в *параграфе 3.2*, при описании систем координат манипуляторов было показано, какие типы движений наиболее просто реализуются в каждой из возможных систем координат.
2. Последовательное разделение движений. (Этот принцип можно рассматривать как частное решение общего противоречия между сложностью действий и точностью их выполнения, когда с возрастанием сложности

неизбежно падает точность.) Управляемое движение в общем случае должно содержать две фазы — грубую и точную. Как было указано в главе 2, в движениях человека можно четко выделить две составляющие: быстрое, но неточное "баллистическое" движение и медленное более точное и осмысленное движение в завершающей фазе. Такое разделение является компромиссным решением задач с противоречивыми требованиями к скорости и точности движения. Аналогичным образом следует строить и движения роботов, на разных этапах движения оперируя разными критериями качества и соответственно получая разные способы реализации движений, включая разные способы управления. Например, при приближении рабочего органа манипулятора к объекту, с которым предстоит выполнение какой-то технологической операции, возможен переход от программного к адаптивному управлению по относительным координатам, связанным с этим объектом. Аналогично при управлении передвижением мобильного робота при приближении к месту остановки обычно переходят от управления скоростью к позиционному управлению.

3. Параллельное разделение движений. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть согласованы, исходя из задачи общего движения робота. Требуемые движения рабочего органа манипулятора реализуются как совокупность его составляющих по отдельным степеням подвижности. Соответственно, требования, предъявляемые к результирующему движению (по точности, быстродействию, грузоподъемности и т. п.), должны быть оптимально распределены между составляющими, которые реализуются с помощью определенных приводов. Например, целесообразно выбирать кинематику манипулятора таким образом, чтобы к степеням подвижности, которые определяют грузоподъемность всего манипулятора, требования к качеству управления были наиболее облегченными, и, наоборот, чтобы были максимально разгружены приводы, обеспечивающие заданную точность позиционирования. Аналогично следует подходить к разделению требований к быстродействию.
4. Сочетания различных способов управления. Различные способы управления движением — автоматическое, программное, адаптивное, интеллектуальное и от человека-оператора — должны применяться в оптимальном сочетании и при максимальном использовании априорной информации, исходя из общих требований к заданному движению манипулятора. При этом надо стремиться максимально детерминировать внешнюю среду, например, при необходимости осуществлять распознавание ее объектов, прибегать к их маркировке и т. п. Необходимо по возможности снижать требования к качеству управления путем применения, в частности, автоматической компенсации влияния возмущающих факторов (нестабильность внешней среды, параметров энергоснабжения и т. д.).

5. Оптимальная последовательность движений по степеням подвижности. Движения по отдельным степеням подвижности принципиально могут выполняться одновременно, последовательно и в различных промежуточных комбинациях. В первом предельном случае, очевидно, обеспечивается наибольшее быстродействие перемещения рабочего органа манипулятора, а во втором могут быть максимально упрощены управление и система приводов (вплоть до применения одного привода для нескольких степеней подвижности).
6. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально взаимосвязаны. Движения, одновременно совершаемые по отдельным степеням подвижности, могут взаимно влиять друг на друга через общую кинематику, нагрузку и т. д. Эти взаимовлияния могут быть как вредными, так и полезными для реализации заданного общего движения, что требует оптимизации. Поэтому для каждого конкретного манипулятора и, более того, для различных видов его движений существует оптимальный алгоритм связанного управления приводами манипулятора, который должен быть определен и по возможности реализован.
7. Управление движением в общем случае должно быть многоуровневым. Поэтому необходимо оптимально разделять общую задачу управления роботом по нескольким уровням. Для разных задач число используемых уровней различно — от прямого управления с верхнего уровня отдельными приводами до использования ранее отработанных типовых алгоритмов и программ, комбинируемых с верхних уровней.
8. Взаимное согласование действий робота и совместно работающего оборудования. Требования к движениям робота должны быть согласованы с требованиями к работающему совместно с ним другому оборудованию, а также и к объектам манипулирования. Эти требования могут быть существенно облегчены за счет часто несущественных изменений конструкции и режима работы этого оборудования как и конструкции объектов, которыми должен манипулировать робот. Сюда относится, например, устройство различных технологических направляющих, упоров и фасок для облегчения захвата и позиционирования перемещаемых предметов, сочленения их друг с другом при сборке и т. п.

5.2. Математическое описание манипуляторов

Робот с позиций теории управления может быть представлен как совокупность объекта управления в виде исполнительных устройств и устройства управления (рис. 5.1, а). Исполнительные устройства в свою очередь состоят из механической системы и приводов (рис. 5.1, б).

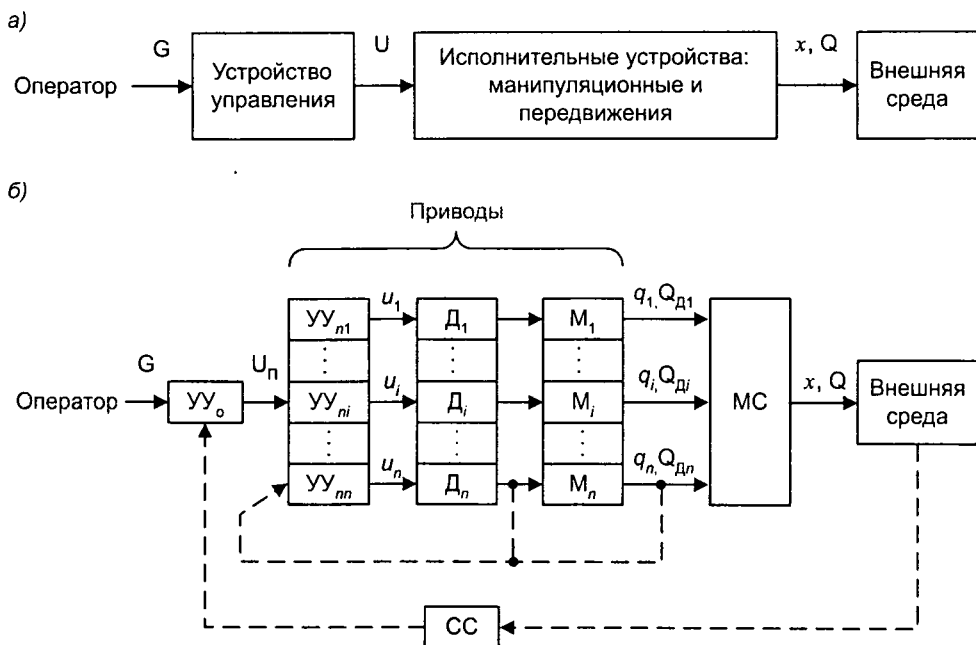


Рис. 5.1. Функциональная схема робота: УУ_о — общее устройство управления; УУ_н — устройство управления привода; Д — двигатель; М — механизм привода; МС — механические системы (манипуляционная и передвижения); СС — сенсорные системы

5.2.1. Математическое описание механической системы манипуляторов

Рассмотрение математического описания роботов начнем с важнейшей их части — манипуляторов. На рис. 5.2 показана типовая кинематическая схема манипуляторов с минимальным числом степеней подвижности.

Механическая система манипулятора как объекта управления характеризуется:

- типом и числом переносных и ориентирующих рабочий орган степеней подвижности;
- типом и размером рабочей зоны, в рамках которой перемещается рабочий орган манипулятора.

Входные переменные механической системы манипулятора — это усилия $Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dn}$ от двигателей Д, действующие по n степеням подвижности, а выходные — координаты рабочего органа x_p и усилие Q_p , с которым он воздействует на объекты внешней среды. Наибольшее число степеней подвиж-

ности рабочего органа m равно 6: 3 координаты, определяющие положение его центра в пространстве, и 3 угла ориентации. Кроме координат рабочего органа интерес могут представлять координаты $x_1, x_2, \dots, x_n$ промежуточных звеньев, определяющие текущую конфигурацию всего манипулятора. Координаты x определяются в системе координат, неподвижной относительно его основания (рис. 5.2), и называются *абсолютными* (опорными, инерциальными). Относительное положение соседних звеньев манипулятора определяется *относительными* (обобщенными) координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$, где n — число степеней подвижности манипулятора.

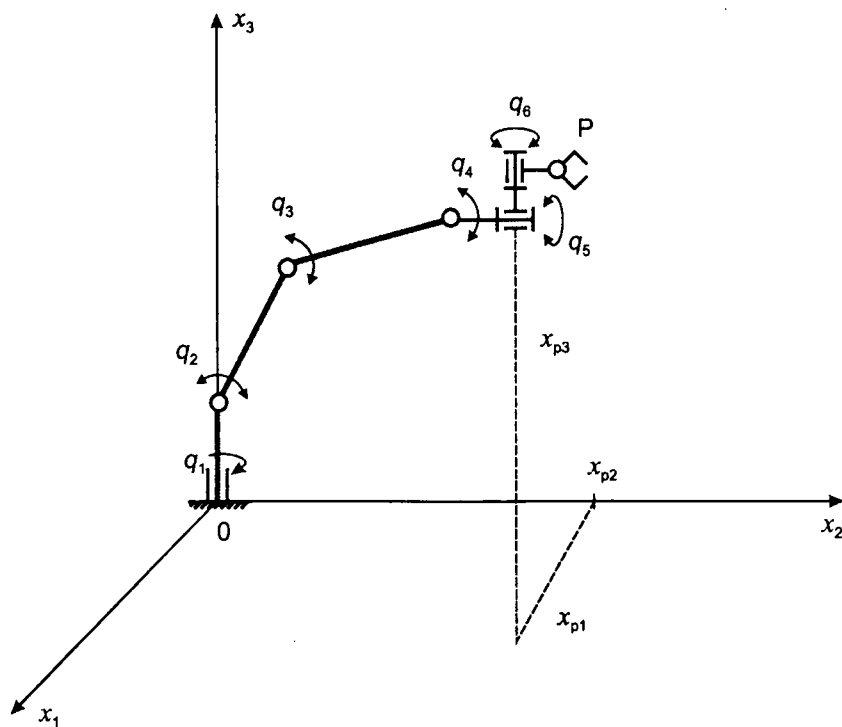


Рис. 5.2. Кинематическая схема трехзвенного шарнирного манипулятора:
 P — рабочий орган; q_1, q_2, q_3 — переносные степени подвижности;
 q_4, q_5, q_6 — ориентирующие степени подвижности

Математическое описание механической системы манипулятора связывает указанные выходные переменные x_i , Q_i со входными Q_{li} . В свою очередь абсолютные координаты x определяются относительным положением звеньев манипулятора, т. е. относительными координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$. В целом механическая система манипулятора описывается системой двух следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_m(Q_d, Q_b). \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Здесь первое уравнение — уравнение кинематики манипулятора, выражающее абсолютные координаты его звеньев $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$, через их относительные координаты $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$, а второе — уравнение динамики для $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$, где $Q_d(Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dn})$ — усилия двигателей, действующие по соответствующим координатам звеньев манипулятора q , а $Q_b(Q_{b1}, Q_{b2}, \dots, Q_{bn})$ — возмущающие и противодействующие усилия. A_m — оператор механической системы манипулятора. Уравнения для усилий Q_p , с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды, будут рассмотрены далее.

Рассмотрим последовательно уравнения (5.1). Уравнение $x=f(q)$ представляет собой выражение для пересчета координат, которое выводится по правилам аналитической геометрии. Пусть требуется найти это выражение для абсолютных координат рабочего органа манипулятора $x_p(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$. Введем для каждого звена свою систему координат, в которой происходит перемещение последующего звена. Если вывести выражение для координат рабочего органа в такой системе координат предыдущего звена, затем аналогично выразить координаты рабочего органа, пересчитанные в систему координат предыдущего звена через координаты предшествующего ему звена, то, действуя таким образом, можно дойти до основания манипулятора, с которым связана система абсолютных координат x . В результате получим искомое выражение абсолютных координат рабочего органа $x_p(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$ через относительные координаты всех звеньев $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$.

Напомним методику такого пересчета координат (рис. 5.3). Пересчет координат точки P из системы (O', x'_1, x'_2, x'_3) в систему (O, x_1, x_2, x_3) описывается векторно-матричным уравнением

$$r = Ar' + n \quad (5.2)$$

или

$$r' = A^{-1}(r - n), \quad (5.3)$$

где $r = r(x_1, x_2, x_3)$; $r' = r'(x'_1, x'_2, x'_3)$;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ — матрица поворота;}$$

$a_{sk} = \cos(i_s, i'_k)$; $s, k = 1, 2, 3$; i_s, i'_k — орты рассматриваемых систем координат.

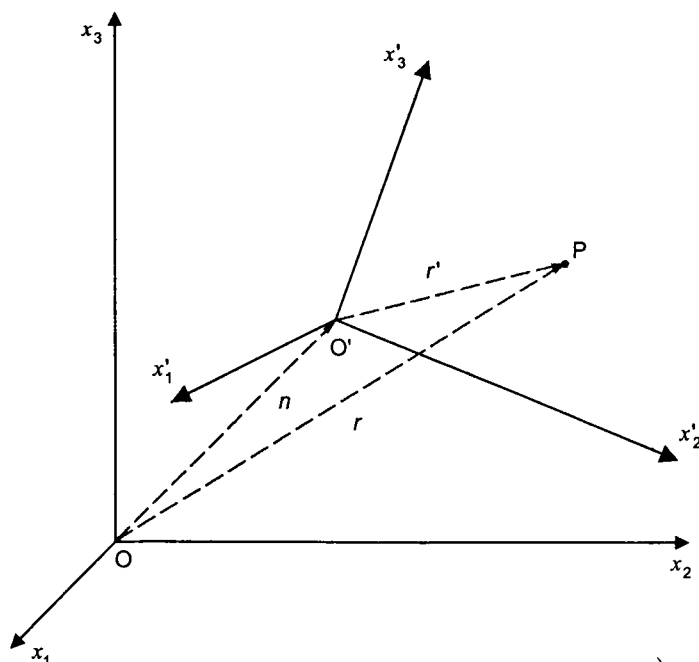


Рис. 5.3. Схема пересчета координат

Для матрицы A справедливы равенства

$$|A| = 1, A^{-1} = A^T, \quad (5.4)$$

где индекс T означает операцию транспонирования матрицы.

Если звенья манипулятора имеют одну степень подвижности друг относительно друга, например, поворот на угол φ , то

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5.5)$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если осуществляется только параллельное смещение в случае поступательного движения звена, уравнение (5.2) принимает вид

$$r = r' + n. \quad (5.6)$$

Совокупность уравнений (5.2), составленных для всех подвижных звеньев манипулятора, дает искомое описание кинематики.

Иногда для решения рассматриваемой задачи пересчета координат используют так называемые однородные координаты путем введения векторов четвертого порядка $r(x_1, x_2, x_3, 1)$ и $r'(x'_1, x'_2, x'_3, 1)$, связанных матрицей

$$B = \left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & n_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & n_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & n_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (5.7)$$

т. е.

$$r = Br'. \quad (5.8)$$

Из (5.7) следует

$$B = \left[\begin{array}{ccc|c} A & & & n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. \quad (5.9)$$

Соответственно, $r' = B^{-1}r$,

$$\text{где } B^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} A & & & -A'n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (5.10)$$

а компоненты вектора $A'n$ есть проекции вектора n на оси системы координат (O', x'_1, x'_2, x'_3) . Таким образом, умножив вектор координат r' на матрицу B , получим выражение (5.2) для r через A и n . Удобство применения однородных координат состоит в том, что поворот и смещение системы координат осуществляются с помощью одной операции умножения на матрицу B . Соответственно окончательное уравнение пересчета координат рабочего органа в систему абсолютных координат, связанных с основанием манипулятора, согласно уравнению (5.6) будет иметь вид

$$r_1 = \prod_{i=1}^n B_i r_n = Br_n, \quad (5.11)$$

где $B = \prod_{i=1}^n B_i$, а r_1 и r_n — соответственно векторы центра рабочего органа в системе координат относительно первого звена манипулятора, т. е. его основания, и последнего звена, т. е. рабочего органа.

Уравнение (5.11) представляет собой уравнение кинематики манипулятора $x = f(q)$ в векторной форме. Аналогично осуществляется вывод выражений через относительные координаты q для углов ориентации рабочего органа в абсолютной системе координат.

Необходимо отметить, что при решении уравнения кинематики должны быть учтены различные конструктивные и прочие ограничения относительных перемещений звеньев q_i .

Перейдем к рассмотрению второго уравнения системы (5.1) — уравнения динамики

$$q = A_m(Q_d, Q_v),$$

которое связывает относительные координаты звеньев q_i с действующими на систему движущими Q_{di} и противодействующими Q_{vi} силами. В зависимости от решаемых задач это уравнение может быть выведено в различной форме из числа известных в теоретической механике — в форме уравнений Ньютона, Гаусса, Даламбера, Лагранжа и их модификаций. Рассмотрим вывод уравнения динамики механической системы манипулятора с помощью уравнения Лагранжа второго рода, которое наиболее часто используется при исследованиях динамики манипулятора [7].

Для i -го звена манипулятора уравнение Лагранжа второго рода в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1,2,3,\dots,n. \quad (5.12)$$

Здесь $L = K - \Pi$ — функция Лагранжа, где K и Π — соответственно кинетическая и потенциальная энергии звена; $Q_i = Q_{di} - Q_{vi}$ — результирующая сила, приведенная к выходу привода звена.

Уравнение (5.12) можно представить в следующей форме:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_{ij} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j + c_i = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.13)$$

Первый член уравнения (5.13) описывает силы, зависящие от ускорения (соответственно коэффициенты при $\ddot{q}_j$ характеризуют инерцию звена); второй член — скоростные силы (центробежные, кореолисовы, вязкого трения и т. п.), третий — гравитационные, статические.

Систему уравнений звеньев (5.13) можно более кратко записать в матрично-векторной форме:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q, \quad (5.14)$$

где $A(q)$ — симметричная матрица размерности $n \times n$, описывающая инерционные свойства системы; $b(\dot{q}, q)$ — вектор скоростных сил размерности n ; $c(q)$ — вектор статических сил размерности n . Физический смысл членов

уравнения (5.14) очевиден, и структура уравнения не зависит от метода, которым оно выведено.

Рассмотрим в качестве примера уравнение динамики трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат (рис. 3.2) [8]. Его кинетическая и потенциальная энергии манипулятора соответственно равны:

$$K = \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_r \left[r^2 + \left(r - \frac{\ell}{2} \right)^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2 \right] +$$

$$+ m_r \frac{\ell^2 \dot{\phi}^2}{24} + \frac{1}{2} m_z \dot{z}^2 + \frac{1}{2} (J_\phi + J'_\phi) \dot{\phi}^2,$$

$$\Pi = (m + m_r + m_z) z g,$$

где m — масса рабочего органа с полезным грузом; m_z — масса вертикальной колонны, движущейся по координате z ; m_r — масса горизонтальной стрелы, движущейся по координате r ; ℓ — длина стрелы; J_ϕ — момент инерции массы колонны m_z , приведенный к оси ϕ ; J'_ϕ — момент инерции частей колонны, участвующих только в угловом движении, приведенный к оси ϕ ; g — ускорение силы тяжести.

Выражение для кинетической энергии соответствует компоновке манипулятора, при которой при среднем положении стрелы она выступает на одинаковую величину $\ell/2$ в обе стороны от вертикальной оси колонны.

Обозначив $q_1 = \phi$, $q_2 = z$, $q_3 = r$ и подставив приведенные ранее выражения для K и Π в (5.12), получим уравнение:

$$\begin{bmatrix} a_\phi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} b_\phi(\dot{\phi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\phi}, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\phi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Здесь $a_\phi(r) = J_\phi + J'_\phi + (m_r + m) r^2 - m_r \ell r + m_r \frac{\ell^2}{3};$

$$a_z = m_z + m_r + m; \quad a_r = m_r + m;$$

$$b_\phi(\dot{\phi}, \dot{r}, r) = 2 \left[(m_r + m) r + m_r \frac{\ell}{2} \right] \dot{r} \dot{\phi};$$

$$b_r(\dot{\phi}^2, r) = 2 \left[m_r \frac{\ell}{2} - (m_r + m) r \right] \dot{\phi}^2; \quad c_z = (m_z + m_r + m) g;$$

M_φ — момент, действующий по координате φ ; F_z , F_r — усилия, действующие соответственно по координатам z и r . (В скобках указаны координаты, которые входят в выражения для данного коэффициента.) Вектор b_φ описывает кореолисову силу, вектор b_r — центробежную, а вектор c — силу тяжести.

Соответственно для уравнения (5.14):

$$A = \begin{bmatrix} a_\varphi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\varphi}, r) \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_z + m_r + m) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}.$$

Уравнение (5.15) можно представить системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_\varphi(r) \ddot{\varphi} + b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) &= M_\varphi, \\ a_z \ddot{z} + c_z &= F_z, \\ a_r \ddot{r} + b_r(\dot{\varphi}, r) &= F_r. \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

На рис. 5.4 показана соответствующая структурная схема, где представлены, в частности, взаимовлияния движений по отдельным степеням подвижности.

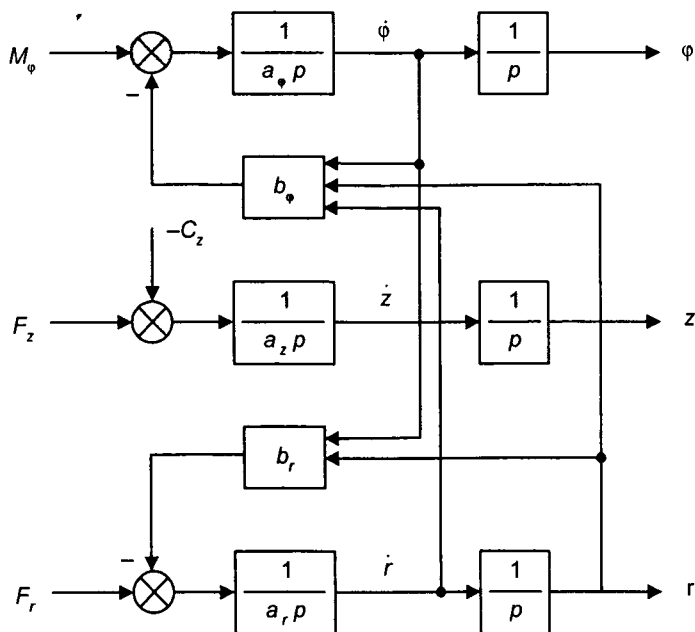


Рис. 5.4. Структурная схема механической системы трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат

Эти нелинейные уравнения можно линеаризовать разложением нелинейных членов в ряд Тейлора с отбрасыванием членов ряда выше первой степени малости. Получим справедливую для малых перемещений систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (a_\phi p + b'_\phi) p \Delta \phi + (b''_\phi p + b'''_\phi + a'_\phi \ddot{\phi}_0) \Delta r &= \Delta M_\phi, \\ a_z p^2 \Delta z &= \Delta F_z, \\ (a_r p^2 + b'_r) \Delta r + b''_r p \Delta \phi &= \Delta F_z. \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Здесь p — символ дифференцирования по времени; $a'_\phi \ddot{\phi}_0$; b'_ϕ , b''_ϕ , b'''_ϕ ; b'_r , b''_r — коэффициенты разложения в ряд Тейлора функций a_ϕ , b_ϕ и b_r при $q = q_0$ и $Q = Q_0$. Индексом "0" отмечены значения переменных, соответствующих статическому режиму, относительно которого берутся их отклонения.

Из уравнения динамики (5.14) для относительных координат q можно получить уравнение для абсолютных координат, используя связывающее эти переменные уравнение кинематики $x = f(q)$.

Для этого надо дважды продифференцировать последнее выражение, чтобы перейти в нем к $\ddot{q}$, входящему в уравнение (5.14):

$$\dot{x} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q},$$

где $J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}$ — $m \times n$ матрица Якоби с элементами $\frac{\partial f_j}{\partial q_i}$; $j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, n$.

$$\ddot{x} = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} = J(q) \ddot{q} + D(\dot{q}, q),$$

где $D(\dot{q}, q) = \dot{J}(q) \dot{q}$ — вектор-столбец с элементами

$$\dot{q}^T \frac{\partial^2 f_k(q)}{\partial q \partial q^T} \dot{q} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial^2 f_k}{\partial q_i \partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j, \text{ где } k = 1, 2, \dots, m.$$

Получив отсюда выражение для $\ddot{q}$ и подставив в уравнение (5.14) или, наоборот, подставив сюда выражение для $\ddot{q}$ из уравнения (5.14), получим искомого уравнение для x :

$$A(q) J^{-1}(q) \ddot{x} - A(q) \dot{J}(q) \dot{x} + b(\dot{q}, q) + c(q) = J^{-T}(q) Q. \quad (5.18)$$

Основной интерес представляет это уравнение для координат рабочего органа манипулятора x_p .

Заметим, что при решении уравнения (5.18) в случае, когда число степеней подвижности манипулятора n больше числа степеней подвижности его рабочего органа m , т. е. имеет место избыточность степеней подвижности, возникает неоднозначность зависимости $q = f^{-1}(x)$ и соответственно $J^{-1}(q)$. Для ее преодоления обычно вводят какие-нибудь полезные дополнительные условия по числу избыточных степеней подвижности.

Выведем теперь уравнения для усилий, с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды. Здесь возможны два варианта. Первый вариант, когда внешняя среда воздействует на манипулятор, оказывая его звеньям определенное сопротивление. В этом случае используется исходное уравнение динамики манипулятора для относительных переменных (5.14) с подстановкой в него указанных сил, пересчитанных на эти координаты.

Получается уравнение:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q' - J^T(q)Q_{\text{внеш}}. \quad (5.19)$$

Здесь $Q' = Q_d - Q_{\text{в1}}$, где $Q_{\text{в1}}$ — внутренние возмущающие силы, $Q_{\text{внеш}}$ — внешние силы, действующие со стороны внешней среды, $J^T(q)$ — транспонированная $n \times m$ матрица Якоби, с помощью которой осуществляется пересчет $Q_{\text{внеш}}$ в систему относительных координат для определенного звена манипулятора. Выражение $J^T(q)Q_{\text{внеш}}$ получается из баланса мощностей $Q_{\text{внеш}}\dot{x} = Q_{\text{в2}}\dot{q}$, где $Q_{\text{в2}}$ — действующие на звенья в системе относительных координат силы, вызванные силой $Q_{\text{внеш}}$.

Второй вариант силового взаимодействия с внешней средой — это силовое воздействие на внешнюю среду рабочим органом самого манипулятора. В этом случае следует пользоваться уравнением динамики для абсолютных координат, по которым осуществляется взаимодействие с внешней средой. Оно получается из уравнения (5.18):

$$A(q)J^{-1}(q)\ddot{x}_p - A(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q)\dot{x}_p + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q_p + Q''. \quad (5.20)$$

Здесь Q_p — выделенные из вектора Q и пересчитанные в систему абсолютных координат усилия, создаваемые приводами на рабочем органе и действующие по $l \leq m$ координатам, по которым осуществляется указанное силовое воздействие на среду. Для остальных $(m-l)$ -координат уравнение динамики остается прежним — (5.14) или (5.18). Q'' — оставшаяся часть Q' , тоже пересчитанная в систему абсолютных координат.

В целом, согласно рассмотренным уравнениям механической системы манипулятора, он как объект управления представляет собой весьма сложный динамический объект. Его выходными переменными являются 6 координат рабочего органа и силы взаимодействия с внешней средой, действующие по некоторым из этих координат. Из них управляемыми переменными общим числом соответственно до 6 могут быть как координаты рабочего органа, так и действующие по их направлениям усилия. Например, при выполнении технологической операции нанесения покрытий с помощью пульверизатора требуется управление всеми 6 координатами, а операция снятия шероховатостей и заусениц с поверхностей требует наряду с управлением координатами для осуществления сканирования рабочим инструментом по этой поверхности управления силой, направленной по нормали к ней.

Сегодня в системах управления манипуляторов управление осуществляется, как правило, не по измеряемым координатам рабочего органа x_p , а относительным координатам q . Объясняется это сложностью измерения абсолютных координат рабочего органа, однако в результате точность позиционирования рабочего органа манипулятора определяется точностью датчиков координат q , а также точностью пересчета от q к x_p . В результате требования к точности датчиков q оказываются в несколько раз выше требуемой точности управления x_p .

Управление усилием на рабочем органе манипулятора осуществляется обычно с помощью многокомпонентных датчиков усилия, расположенных в запястье рабочего органа или вычислителей этих усилий (наблюдателей) по измеряемым другим переменным, входящим в уравнение динамики манипулятора (см. параграф 8.5).

5.2.2. Взаимное влияние степеней подвижности манипуляторов

Как ранее показано, динамика механической системы манипуляторов может быть описана в относительных координатах следующим векторно-матричным уравнением:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q.$$

Здесь $A(q)\ddot{q}$ — векторная функция сил инерции, пропорциональных ускорению, где $A(q)$ — симметричная $n \times n$ матрица, описывающая инерционные свойства системы, n — число ее степеней подвижности; $b(\dot{q}, q)$ — n -мерный вектор скоростных сил — центробежных, кореолисовых, трения и зависящих от скорости потерь в сочленениях; $c(q)$ — n -мерный вектор сил тяжести; Q — вектор сил, действующих по n степеням подвижности системы.

Наличие q в скобках означает, что члены этого уравнения зависят от конфигурации манипулятора, т. е. что его механическая система является нестационарной. Важным ее свойством является также взаимосвязанность степеней подвижности, т. е. влияние их друг на друга. Существует четыре типа такого взаимовлияния: влияние на величину инерции и влияния по ускорению $\ddot{q}$, по скорости $\dot{q}$ и положению q .

Первые два типа взаимовлияния учитываются матрицей

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}.$$

Влияние на инерцию по i -й степени подвижности других степеней учитывается в диагональных элементах a_{ii} матрицы. Так, в приведенном ранее примере цилиндрической трехстепенной системы такое влияние описывается элементом $a_{\phi}(r)$ в уравнении (5.15). Здесь имеет место зависимость момента инерции по координате ϕ от координаты r : с выдвиганием горизонтальной стрелы манипулятора растет инерция вращения его колонны относительно вертикальной оси.

В манипуляторах со сферической системой координат (см. рис. 3.3) величина выдвигания стрелы r влияет на моменты инерции относительно осей ϕ и θ . Аналогичное влияние положения звеньев на момент инерции относительно предыдущих осей существует и в манипуляторах с угловой системой координат (см. рис. 3.4).

Второй тип взаимовлияния — по ускорению $\ddot{q}$ описывается недиагональными элементами a_{ij} матрицы $A(q)$. Оно заключается в действии по отдельным степеням подвижности сил инерции, пропорциональных ускорениям по другим степеням подвижности. Такое влияние имеет место, например, в шарнирных манипуляторах от предыдущего шарнира на последующие, действующие в одной с ним плоскости.

Третий тип влияния — по скорости $\dot{q}$ описывается вектором $b(\dot{q}, q)$. В упомянутом примере манипулятора с цилиндрической системой координат — это центробежная сила, действующая по координате r в функции скорости $\dot{\phi}$ (см. выражение для $b_r(\dot{\phi}, r)$ в уравнении (5.15)), и кореолисова сила, действующая по ϕ в функции от произведения $\dot{\phi}\dot{r}$ (см. там же выражение для $b_{\phi}(\dot{\phi}, \dot{r}, r)$).

Четвертый тип влияния — по силе тяжести учитывается вектором $c(q)$. Это влияние силы тяжести звеньев, движущихся не в горизонтальной плоскости. Такое влияние, например, существует в шарнирных манипуляторах, работающих в вертикальной плоскости.

Таким образом, как объекты управления манипуляторы представляют собой многомерные взаимосвязанные системы. Конечно, эта взаимосвязанность усложняет задачу управления такими объектами, однако она не обязательно оказывает отрицательное влияние на качество управления. Так, в рассмотренном ранее примере манипулятора с цилиндрической системой координат при выдвижении его стрелы, т. е. увеличении r , вращение колонны способствует этому движению стрелы за счет центробежной силы по ϕ . Поэтому, хотя с точки зрения облегчения задачи управления желательно каким-то образом развязывать степени подвижности манипулятора, чтобы иметь возможность управлять ими независимо, такой подход в общем случае не является наилучшим в отношении качества управления. Теоретически оптимальное решение дает представление манипулятора в качестве объекта управления как единой многомерной взаимосвязанной системы.

Рассмотрим способы борьбы с взаимовлиянием степеней подвижности, которые следует применять, чтобы в случае необходимости освободиться от этих взаимовлияний. Существуют 2 группы таких способов:

- ☐ конструктивные, основанные на уравнивании масс звеньев манипулятора;
- ☐ алгоритмические, реализуемые системой управления.

Простейший вариант первого способа — это уравнивание масс звеньев противовесами, в том числе автоматически перемещающимися для уравнивания переменных масс, например, полезного груза. Для манипуляторов, все звенья которых перемещаются в одной плоскости, такое уравнивание может обеспечить полное устранение взаимовлияний степеней подвижности (рис. 5.5). Условие уравнивания заключается в равенстве моментов сил веса противовесов и веса уравниваемых ими звеньев относительно их оси вращения. Очевидный недостаток такого способа — увеличение инерции звеньев манипулятора и его общей массы. В связи с этим для уменьшения момента инерции целесообразно уменьшать расстояние противовеса до оси вращения за счет пропорционального увеличения его массы, т. к. момент инерции пропорционален квадрату этого расстояния, в то время как для снижения массы манипулятора следует поступать противоположным образом.

Лучшим решением рассматриваемой задачи является использование в качестве противовеса конструктивно необходимых частей манипулятора путем

размещения их по разные стороны от оси вращения. К таким частям могут относиться, например, элементы приводов и рабочих органов манипулятора.

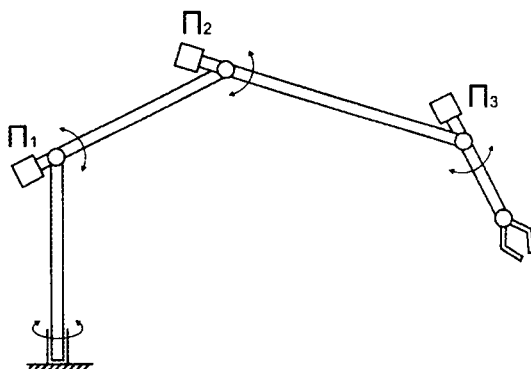


Рис. 5.5. Шарнирный манипулятор с противовесами (Π_1 , Π_2 , Π_3)

Кроме противовесов для уравнивания звеньев применяются пружины и дополнительные приводы, создающие необходимое уравнивающее усилие. Пружинные уравнивающие механизмы помимо устранения взаимовлияния степеней позволяют скомпенсировать и гравитационные силы, в том числе полезного груза, и соответственно снизить требуемую мощность двигателей или повысить грузоподъемность манипулятора.

Вторая группа способов устранения взаимовлияния степеней подвижности, основанная на использовании системы управления, заключается в компенсации этих влияний с помощью перекрестных управляющих воздействий на приводы. Например, таким образом могут быть скомпенсированы взаимные влияния степеней подвижности манипулятора с цилиндрической системой координат (рис. 5.4). Для этого через приводы M_φ и F_r надо ввести перекрестные воздействия, компенсирующие взаимовлияния между φ и r , описываемые звеньями b_φ по $\dot{r}$ и b_r по $\dot{\varphi}$.

Самым общим средством уменьшения рассматриваемых взаимовлияний является повышение быстродействия управления степенями подвижности манипулятора, поскольку это соответственно повышает эффективность парирования любых возмущений, действующих на эти степени подвижности, включая, разумеется, и их взаимовлияния.

5.2.3. Учет упругости звеньев манипулятора

Уравнение динамики (5.14) механической системы манипулятора выведено в предположении абсолютной жесткости ее звеньев, т. е. отсутствии их упру-

гих деформаций. Рассмотрим теперь, как учитывать эти деформации, и выведем соответствующее уравнение динамики.

В звеньях манипуляторов возможны 2 типа упругости — *сосредоточенная* и *распределенная*. Сосредоточенная упругость может иметь место в сочленениях звеньев, в передачах (зубчатых, цепных, тросовых и т. п.). Распределенная упругость вызывается гибкостью звеньев, их изгибом или скручиванием.

Упругие деформации обычно нежелательны, т. к. они порождают колебания, снижающие быстродействие и создающие дополнительные динамические нагрузки на приводы.

Основная причина появления упругих деформаций — это стремление снизить массу механической системы манипулятора. Минимум ее массы имеет место при расчете манипулятора не на жесткость, а на прочность со снятием соответственно ограничений на упругие деформации в механической системе. Поскольку это неизбежно ведет к усложнению системы управления, оптимальное решение должно находиться при синтезе обеих систем совместно.

Однако упругость может играть и положительную роль. Так, часто в запястье рабочего органа вводят упругость для создания податливости полезной при выполнении сборочных и других операций с объектами внешней среды. Наконец, существуют манипуляторы типа хобота, в которых управляемая гибкость лежит в основе их принципа действия (см. рис. 3.11).

На рис. 5.6 показана расчетная двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью. Здесь M_1 , M_2 — соответственно движущий момент на входе и момент нагрузки на выходе звена; J_1 , J_2 — моменты инерции; q_1 , q_2 — относительные координаты (здесь — углы поворота) на входе и выходе звена, так что разность $(q_1 - q_2)$ — есть угол скручивания гибкого элемента, представленного в виде пружины.

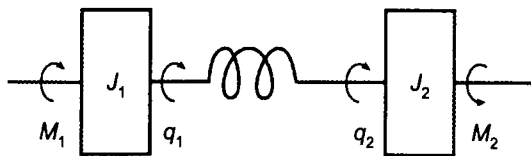


Рис. 5.6. Двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью

Математическое описание этого звена:

$$\left. \begin{aligned} J_1 p^2 q_1 &= M_1 - k' p (q_1 - q_2) - k (q_1 - q_2), \\ J_2 p^2 q_2 &= k' p (q_1 - q_2) + k (q_1 - q_2) - M_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

Здесь k, k' — коэффициенты жесткости и вязкого трения гибкого элемента, p — символ дифференцирования по времени.

Исключив q_1 , получим уравнение для q_2 :

$$p^2 (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) q_1 = (k_1' p + k_1) M_1 - (k_2'' p^2 + k_2' p + k_2) M_2. \quad (5.22)$$

Здесь $T_1 = \frac{1}{\omega_0}$, $T_2 = \frac{2\xi_0}{\omega_0}$;

$$k_1' = \frac{2\xi_2 \omega_2}{\omega_0^2 J_1}, \quad k_1 = \frac{\omega_2^2}{\omega_0^2 J_1}, \quad k_2'' = \frac{1}{\omega_0^2 J_2}, \quad k_2' = \frac{2\xi_1 \omega_1}{\omega_0^2 J_2}, \quad k_2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2 J_2};$$

$\omega_0 = \left(\frac{k}{J_1} + \frac{k}{J_2} \right)^{1/2}$ — собственная частота звена;

$\omega_1 = \left(\frac{k}{J_1} \right)^{1/2}$, $\omega_2 = \left(\frac{k}{J_2} \right)^{1/2}$ — парциальные частоты;

$\xi_1 = \frac{k'}{2} (k J_1)^{1/2}$, $\xi_2 = \frac{k'}{2} (k J_2)^{1/2}$, $\xi_0 = \frac{k'}{2} \left(\frac{k J_1 J_2}{J_1 + J_2} \right)^{1/2}$ — показатели затухания колебаний.

При отсутствии вязкого трения $k_2' = 0$ и поэтому $\xi_0 = 0$ и $T_0 = 0$. Звено становится колебательным с нулевым затуханием.

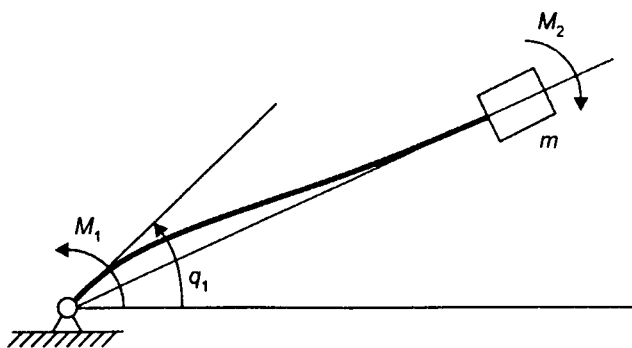


Рис. 5.7. Модель звена с распределенной упругостью

Типичное звено с распределенной упругостью — это гибкий стержень, показанный на рис. 5.7. Стержень с массой m на конце изгибается при его повороте под действием момента M_1 при наличии какого-либо противодействующе-

го момента M_2 . Такое звено с распределенными параметрами описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Этому соответствует бесконечное число степеней свободы и целый спектр частот колебаний. Однако, если нас интересует только положение конечной точки стержня с массой m , эту модель можно свести к ранее рассмотренной дискретной двух-массовой модели. Это соответствует учету только одной основной гармоника колебаний из всего спектра [8].

Уравнение динамики всей механической системы манипулятора, содержащей рассмотренные ранее упругие звенья, можно представить в таком виде:

$$\begin{bmatrix} A_{11}(q, q_y) & A_{12}(q, q_y) \\ A_{21}(q, q_y) & A_{22}(q, q_y) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(\dot{q}, q; \dot{q}_y, q_y) \\ b_2(\dot{q}, q; \dot{q}_y, q_y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k' \dot{q}_y + k q_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(q, q_y) \\ c_2(q, q_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_d \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.23)$$

По сравнению с уравнением (5.14) манипулятора без упругих деформаций здесь появились новые "упругие" координаты q_y и соответствующее уравнение для них. В нем k, k' — матрицы коэффициентов жесткости и вязкого трения гибких звеньев.

Уравнение (5.23) выводится так же, как ранее уравнение (5.14) для жесткой механической системы манипулятора, с помощью уравнения Лагранжа второго рода (5.12), если в выражениях для кинетической и потенциальной энергий звеньев учесть гибкие звенья.

Для более точного описания звена с распределенной упругостью, учитывающего высшие гармоники колебаний, оно разбивается на несколько частей, каждая из которых описывается рассмотренным ранее образцом (метод конечных элементов).

При решении задачи управления манипулятором с гибкими звеньями необходимо принимать специальные меры для гашения колебаний, вызываемых упругими деформациями в этих звеньях. Основным способом являются обратные связи по величине упругих деформаций и их первой производной. Главная проблема при этом состоит в их определении путем измерения этих деформаций специальными датчиками или путем их расчета с помощью функционально связанных с ними измеряемых переменных (передаваемое через гибкое звено усилие, вызванное последним ускорением и т. п.). Применяются также стабилизирующие обратные связи непосредственно по этим переменным, не вычисляя деформаций.

5.2.4. Математическое описание приводов

Приводы, применяемые в манипуляторах, были рассмотрены в главе 4. Это электрические, гидравлические и пневматические позиционные приводы. Кроме того, возможно применение в манипуляторах шаговых приводов и приводов с управляемыми муфтами и нерегулируемыми двигателями.

Математическое описание системы приводов манипулятора — это зависимость

$$Q_d = A_n(U_n), \quad (5.24)$$

где Q_d — вектор движущих сил на выходе приводов манипулятора размерности n , приводящих в движение его степени подвижности; A_n — оператор системы приводов; U_n — вектор управляющих воздействий на входе этой системы.

Что касается перемещений q на выходе приводов, то поскольку последние связаны общей механической системой манипулятора, они не являются независимыми переменными и для их нахождения надо решать совместно систему уравнений, описывающих механическую систему с приводами.

Математическое описание двигателя отдельного привода с угловым перемещением (вращающегося) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} J_d p \omega_d &= M_d - M_n, \\ (T_d p + 1) M_d &= f(U_n, \omega_d). \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

Здесь J_d — момент инерции; M_n — момент нагрузки на валу двигателя; M_d — движущий момент, развиваемый двигателем; ω_d — угловая скорость; T_d — постоянная времени цепи, связывающей M_d с управляющим воздействием U_n ; $f(U_n, \omega_d)$ — статическая характеристика двигателя.

Последняя зависимость в линейном приближении имеет вид:

$$f(U_n, \omega_d) = k_U U_n - k_\omega \omega_d. \quad (5.26)$$

С использованием этого выражения система (5.25) приводится к уравнению:

$$(T'_d T_d p^2 + T'_d p + 1) \omega_d = k U_n - \frac{T_d + 1}{k_\omega} M_n, \quad (5.27)$$

где $T'_d = \frac{J_d}{k_\omega}$, $k = \frac{k_U}{k_\omega}$.

Для электрического двигателя T_d — это электромагнитная постоянная времени, которой обычно можно пренебречь по сравнению с постоянной времени T'_d , определяемой J_d . При $T_d = 0$ уравнение (5.27) принимает вид:

$$(T'_d p + 1) \omega_d = k U_n - \frac{1}{k_\omega} M_n. \quad (5.28)$$

Математическое описание привода включает, помимо двигателя, описание механической передачи на выходе (например, редуктора) и устройства управления. Для типовой схемы привода алгоритм, реализуемый его устройством управления, — это пропорционально-дифференцирующее (ПД), реже пропорционально-интегро-дифференцирующее (ПИД) управление.

При исследовании динамики манипуляторов "в большом" необходимо учитывать нелинейность статической характеристики двигателя — нечувствительность и насыщение, которые ограничивают быстрдействие привода.

5.2.5. Математическое описание манипулятора с приводами

В общем виде математическое описание манипулятора включает рассмотренные зависимости:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_m(Q_d, Q_b), \\ Q_d &= A_n(U_n). \end{aligned} \right\} \quad (5.29)$$

Здесь A_m и A_n — операторы механической системы и системы приводов манипулятора, а U_n — вектор управляющих воздействий на входе системы приводов.

Воспользовавшись уравнением динамики манипулятора (5.14) и линеаризованным уравнением привода по схеме на рис. 4.1, получим схему, показанную на рис. 5.8, и соответствующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A(q) p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= Q_d - Q_b, \\ Q_d &= W_{n2}(p) U_n - J_d p^2 q, \\ U_n &= W_{n1}(p)(q - q_3) - W_{n3}(p) pq. \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

Здесь $W_{n2}(p)$ — передаточная матрица системы приводов, связывающая векторы Q_d и U_n ; $W_{n1}(p)$; $W_{n3}(p)$ — передаточные матрицы последовательного и

параллельного корректирующих звеньев; J_d — диагональная матрица моментов инерции двигателей, приведенных к выходу приводов q (умножением на квадрат передаточного отношения редуктора).

Исключив в (5.30) промежуточные переменные, можно получить следующее общее уравнение:

$$\begin{aligned} & [J_d + A(q)] p^2 q + b(pq, q) + c(q) = \\ & = W_{n1}(p) W_{n2}(p) (q - q_3) - W_{n2}(p) W_{n3}(p) q - Q_B. \end{aligned} \quad (5.31)$$

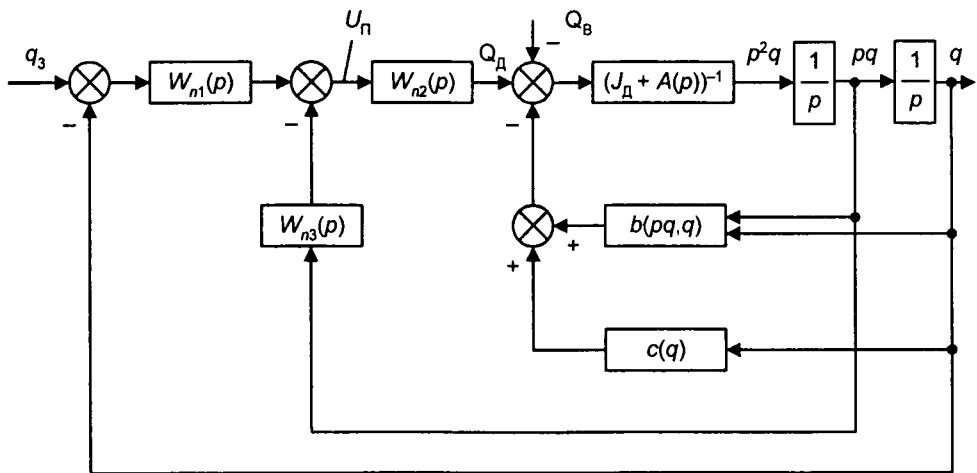


Рис. 5.8. Структурная схема манипулятора с приводами

В схему на рис. 5.8 могут быть введены и различные нелинейности типа насыщения, нечувствительности, сухого трения и т. п.

Вместе с тем при исследовании конкретных режимов работы в рассмотренном математическом описании могут быть сделаны и следующие упрощения.

1. При невысоких скоростях движения (примерно менее 0,5 м/с), когда динамическое взаимовлияние приводов мало, можно пренебречь этим взаимовлиянием по ускорению и скорости, т. е. недиагональными элементами матрицы $A(q)$ и смешанными произведениями скоростей в выражении $b(pq, q)$.

В этом случае левая часть уравнения (5.31) принимает вид:

$$[J_d + J_s(q)] p^2 q + b(pq, q) + c(q).$$

Здесь $b(pq, q) = \sum_{i=1}^n b_{ii}(q) (pq_i)^2$, т. е. не содержит членов $b_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j$;

$J_s(q) = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n)$ — диагональная матрица эффективных моментов инерции относительно q_i i -го и всех последующих $(i+1), \dots, n$, звеньев, которая находится по формуле:

$$J_{is} = \frac{\partial Q_{di}}{\partial \ddot{q}_i}, \quad (5.32)$$

т. е. исходя из уравнения динамики механической системы манипулятора при замене $A(q)$ на $J_s(q)$. Соответственно это выражение можно представить так:

$$J_{is}(q) = \left(\frac{\partial \ddot{q}_i}{\partial Q_{di}} \right)^{-1} = [A^{-1}(q)]_{ii}^{-1}. \quad (5.33)$$

Кроме того, при наличии в приводах редукторов с большим передаточным числом можно пренебречь величинами $J_{di}(q)$ по сравнению с J_{ii} и соответственно в уравнении (5.31) пренебречь $A(q)$.

2. Обычно, особенно при невысоких скоростях движения, переходные процессы в приводах протекают существенно быстрее, чем перемещения самого манипулятора. Поэтому уравнение манипулятора (5.31) можно разделить на 2 решаемых независимо: одно уравнение в виде уравнения (5.31) при $p = 0$ в его правой части и второе в виде второго и третьего уравнений системы (5.30).
3. Можно, используя метод "замороженных" коэффициентов, разбить рабочую зону манипулятора на участки, в которых в членах $b(pq, q)$ и $c(q)$ уравнения динамики манипулятора ставить постоянные значения q .

5.3. Математическое описание систем передвижения роботов

Математическое описание систем передвижения роботов, как и их манипуляционных систем, состоит из описания механической системы и системы приводов. Если дальность передвижения робота сравнима с размером рабочей зоны его манипулятора, математическое описание системы передвижения можно вообще включить в описание манипулятора, добавив в него степени подвижности системы передвижения. В общем случае, когда, как чаще всего и бывает, манипуляционная система и система передвижения действуют

в разное время, в таком объединении нет смысла, т. к. обе системы все равно рассматриваются отдельно.

Общая особенность приводов систем передвижения роботов в том, что их основной режим — это управление по скорости с переходом на позиционное управление при остановках.

5.4. Математическое описание человека-оператора

Наряду с автоматическим управлением в системах робототехники широко применяется и управление со стороны человека-оператора. В этих случаях человек входит в контур управления, который замыкается через его органы чувств, и соответственно должен быть представлен в структурной схеме всей робототехнической системы и ее математическом описании. Такая система относится к человеко-машинным системам и ее описание состоит из 2 частей:

$$\left. \begin{aligned} x &= A_t(G), \\ G &= A_q(G_q). \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

Здесь G — задающее воздействие на техническую систему от человека-оператора, а G_q — задание, которому следует он сам. Первое уравнение описывает техническую часть системы, а второе — человека-оператора. A_t и A_q — их операторы.

В первом приближении человек-оператор математически может быть представлен звеном чистого запаздывания с величиной времени запаздывания в среднем в сотни миллисекунд. Задержка реакции человека непостоянна и зависит от двух составляющих:

- ☐ латентного (скрытого) периода реакции, т. е. чистого запаздывания реакции оператора от появления воздействия на его органы чувств до начала исполнительной реакции;
- ☐ моторная компонента, т. е. длительность этой реакции.

Величина латентного периода непостоянна, различна для разных органов чувств и находится в следующих пределах:

☐ осязание (тактильное воздействие)	90—220 мс;
☐ слух (звук)	120—180 мс;
☐ зрение (свет)	150—200 мс;
☐ обоняние (запах)	310—390 мс;

☐ температурное воздействие	280—1600 мс;
☐ болевое ощущение	130—890 мс.

Эта величина зависит от интенсивности входного воздействия и уменьшается с его ростом. Однако очень сильное воздействие, наоборот, может вызвать так называемое охранное торможение.

Моторная составляющая

$$t_p = t_{p \text{ мин}} + aI^{-n}, \quad (5.35)$$

где $t_{p \text{ мин}}$ — минимальное время реакции (в оптимальных условиях); a — коэффициент переменной составляющей t_p ; I — интенсивность внешнего воздействия; n — показатель степени, зависящий от характеристики внешнего воздействия и условий эксперимента.

Параметры оператора существенно зависят от его состояния и обучения. Состояние (работоспособность) оператора изменяется в процессе его работы, проходя следующие 3 основные фазы: обучение, установившийся режим, утомление.

Наконец, оператор может просто ошибаться ("человеческий фактор"), что в данном случае означает отказ (сбой) системы управления. Надежность оператора характеризуется статистически средней интенсивностью ошибок. Эта величина помимо состояния оператора зависит еще от количества операций, выполняемых оператором: с ростом их числа интенсивность ошибок, оставаясь вначале неизменной, начинает затем расти вплоть до перехода оператора в состояние полной неработоспособности. Человек не способен воспринимать больше 3 сообщений одновременно и более 30 бит/с информации (реально: 1—5 бит/с).

Инженерами-психологами разработаны рекомендации по проектированию пультов оператора, включая размещение устройств отображения информации и органов управления, а также по оптимальному распределению функций между человеком-оператором и техникой.

Вследствие сложности учета всех особенностей человека-оператора как звена человеко-машинных систем при их проектировании помимо математического моделирования особенно большое значение имеет физическое моделирование, т. е. экспериментальное исследование системы управления с человеком в ее контуре. Параметры собственно человека-оператора и их оценка при отборе операторов также определяются экспериментально.

5.5. Компьютерное моделирование робототехнических систем

Вследствие сложности робототехнических систем основным средством их исследования помимо, разумеется, физического моделирования и натурных исследований является компьютерное моделирование роботов при решении задач как анализа, так и синтеза.

Предварительными этапами такого исследования является решение двух задач:

- ☐ доказательство достоверности используемого математического описания, т. е. решение задачи идентификации [8];
- ☐ разработка компьютерной модели и доказательство ее адекватности исходному математическому описанию [9].

Задача идентификации включает этапы структурной и параметрической идентификации. В рамках первого этапа необходимо определить существенные свойства объекта исследования, отбросив те, которыми, исходя из конкретных целей предстоящего исследования, можно пренебречь. В результате определяется структура объекта. Прежде всего, здесь надо рассмотреть и учесть нелинейности, ограничения, упругости, взаимовлияния степеней подвижности манипуляторов.

На этапе параметрической идентификации должны быть установлены с оценкой точности численные значения всех параметров определенной на предыдущем этапе структурной схемы системы, диапазоны их изменения и другие количественные зависимости и характеристики.

Задача разработки компьютерной модели заключается в создании программы численного решения системы уравнений, описывающей объект исследования, на основе одного из известных методов численного интегрирования. На рис. 5.9 дана обобщенная схема соответствующего пакета программ для рассмотренного ранее математического описания манипуляторов. Пакет имеет модульную структуру и включает головную управляющую программу и набор подпрограмм. Управляющая программа обеспечивает ввод исходных данных, их предварительную обработку и формирование заданий. В блоке "Сборка уравнений кинематики" формируются матрицы пересчета координат, программы пересчета абсолютных и относительных координат. В блоке "Решение уравнений кинематики" осуществляется расчет программных траекторий $q_3(t)$ по $x_p(t)$, т. е. решение обратной задачи кинематики. В блоке "Сборка уравнений динамики" вычисляются коэффициенты уравнения динамики для механической системы манипуляторов. В блоке "Уравнение динамики системы" формируется правая часть этого уравнения, включая приводы

и устройство управления робота, т. е. для случая замкнутой системы управления.

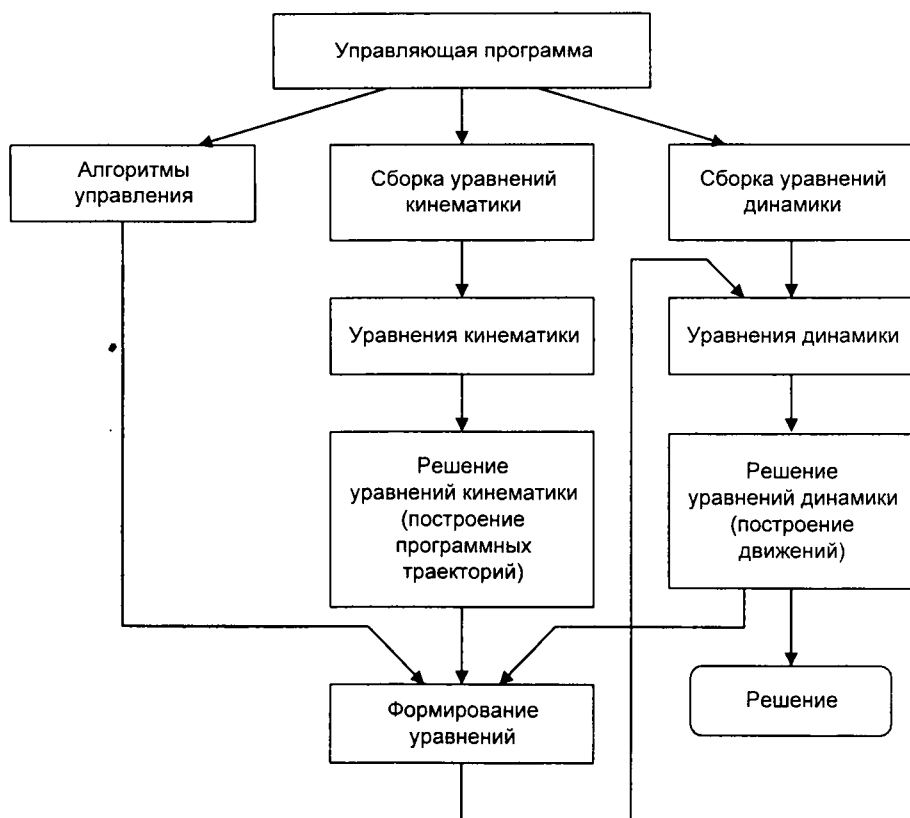


Рис. 5.9. Схема пакета программы моделирования манипуляционных систем

Процесс моделирования, например, программного движения манипулятора протекает так: по дискретным значениям заданной траектории движения рабочего органа и развиваемых им усилий вычисляются соответствующие заданные значения относительных перемещений приводов и их усилий. Затем для этих значений вычисляются значения отработанных переменных и соответствующие погрешности их отработки, а также при необходимости показатели качества переходных процессов. Далее могут определяться другие характеристики исследуемой системы: чувствительность к изменениям отдельных параметров, зависимость качества управления от конфигурации манипулятора и веса полезного груза и т. п.

Описанная последовательность соответствует решению задачи анализа. Задача синтеза — структурного и параметрического — требует, прежде

всего, выбора критериев качества. Затем решается оптимизационная задача выбора варьируемой части структурной схемы и ее параметров. Последняя задача, вследствие сложности объекта исследования, решается обычно путем последовательных приближений, начиная с предельно упрощенной модели с последовательным ее усложнением и соответствующим уточнением решения. Последние этапы этого процесса часто выполняются по процедуре анализа, т. е. исследования влияния вновь вводимых элементов схемы и соответствующей коррекции ранее найденного решения задачи синтеза, в том числе и путем введения дополнительных корректирующих звеньев (изменения структуры системы) [9].

ГЛАВА 6

ДИСКРЕТНОЕ ЦИКЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

6.1. Особенности цикловых систем управления роботом

Рассмотрев математическое описание робота как объекта управления, приступим к изучению способов и систем его управления. При этом пойдем от простого к все более сложному, а именно начнем с систем программного автоматического управления, затем рассмотрим системы адаптивного и интеллектуального управления, требующие очувствления роботов, т. е. оснащения их сенсорными системами. После этого перейдем к системам управления с участием человека-оператора. В заключение будут рассмотрены системы группового управления, как собственно средствами робототехники, так и совместно с другими объектами в составе технологических комплексов.

Что касается систем программного управления, то здесь мы так же начнем с простейших дискретных цикловых систем.

Самый распространенный тип роботов с цикловым программным управлением — это пневматические промышленные роботы. Примером робота может служить показанный на рис. 4.4 робот МП-9С.

Устройство управления робота (см. УУ₀ на рис. 5.1) реализует общесистемный уровень управления, задача которого осуществлять координацию работы приводов. Последняя заключается в установлении определенной последовательности включения отдельных приводов и необходимых выдержек времени между этими моментами.

Такое простейшее управление применяется по отдельным степеням подвижности и в электромеханических и гидравлических работах, когда это допустимо, и, например, часто в захватных устройствах.

6.2. Цикловое управление отдельным приводом

На рис. 6.1 показан процесс циклового программного управления приводом. Он состоит из трех этапов: разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. Длительность второго этапа — установившегося движения с постоянной скоростью определяется величиной заданного перемещения привода. Если эта величина меньше суммы времени разгона и торможения, второй этап вообще будет отсутствовать (пунктирные кривые на рис. 6.1).

Изображенный на рис. 6.1 процесс соответствует следующему описанию:

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} a_1 = \text{const} & \text{при } t \leq t_1, \\ 0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ a_2 = \text{const} & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (6.1)$$

где a_1 и a_2 — ускорения разгона и торможения, или для скоростей:

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} a_1 t & \text{при } t \leq t_1, \\ V_0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ V_0 - a_2 (t - t_2) & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (6.2)$$

где $V_0 = a_1 t_1$ — установившаяся скорость.

Выражения (6.1) соответствуют упрощенному описанию процесса циклового управления без учета динамики демпфера, возможной упругости механической передачи и без учета переходных процессов движения рабочего тела в трубопроводах. Все это необходимо учитывать при математическом описании привода для проведения количественных точных расчетов.

Особенно важно учитывать упругие деформации, которые создают колебательность в цикловых приводах при их разгоне и торможении. Наиболее нежелательны колебания, возникающие при торможении привода, т. к. они затягивают процесс его остановки и, следовательно, снижают быстродействие. Колебания, возникающие на этапе разгона привода, обычно успевают затухнуть к моменту его торможения и поэтому менее вредны. Однако, если длительность этапа движения с постоянной скоростью мала, эти оба типа колебаний могут сложиться, что еще более затруднит процесс торможения.

Поскольку при цикловом управлении торможение привода осуществляется демпфером при наезде им на упор, гашение при этом возможных колебаний — задача настройки демпфера, т. е. подбора величины создаваемой им силы вязкого трения.

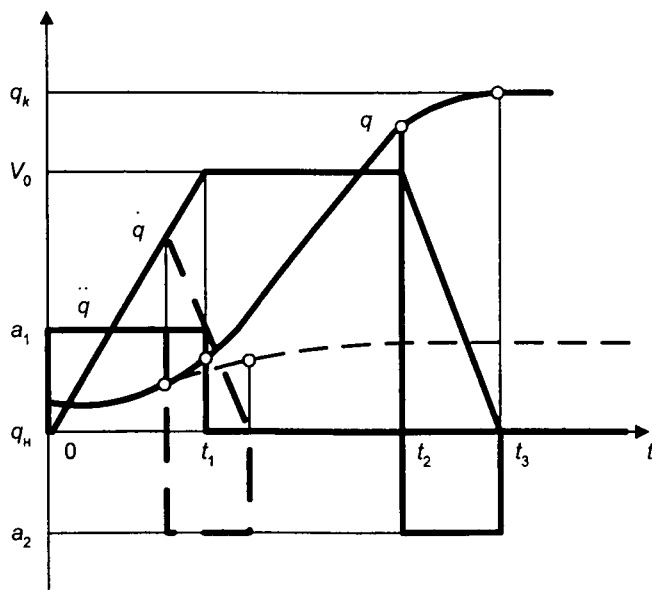


Рис. 6.1. Процесс циклового управления приводом

Хотя цикловое управление — это простейший способ одношагового дискретного управления, его не следует рассматривать как вырожденный вариант многошагового дискретного позиционного управления. Системы циклового управления принципиально отличаются от них способом позиционирования с помощью механических упоров. Это обеспечивает цикловым системам значительно большие точность и быстродействие.

Что касается быстродействия, то, как следует из теории оптимальных систем управления, именно релейное управление обеспечивает для объектов типа исполнительных систем роботов теоретически максимальное быстродействие. Поэтому, как будет показано далее, и в других системах дискретного и непрерывного управления часто вводят релейные приставки для обеспечения наибольшего быстродействия.

6.3. Совместное цикловое управление приводами манипуляторов

Особенностью совместного управления приводами манипуляторов является необходимость учета их взаимовлияния (см. пункт 5.2.2). Рассмотрим это явление для циклового управления на примере манипулятором с цилиндрической системой координат, типичной для роботов с таким управлением (см. рис. 3.2). Как было выяснено (см. рис. 5.4), в таком манипуляторе имеет

место взаимное влияние приводов поворота φ и выдвижения r . На координату r действует центробежная сила, пропорциональная скорости $\dot{\varphi}$, а на координату φ — кореолисова сила, пропорциональная с обратным знаком произведению $\dot{\varphi} \dot{r}$. В результате при одновременном повороте колонны манипулятора и выдвижении его стрелы центробежная сила будет ускорять выдвижение по r , а кореолисова сила — замедлять поворот φ .

Отсюда следует, что для повышения быстродействия при выполнении манипулятором такого совместного движения привод стрелы нужно включать как можно позже включения привода поворота колонны. В этом случае будет максимален эффект ускорения выдвижения стрелы за счет центробежной силы и минимально торможение поворота колонны кореолисовой силой. Иными словами, условием максимального быстродействия в этом случае будет начало движения по φ с последующим включением привода r с задержкой по времени, обеспечивающей одновременное завершение обоих движений.

При выполнении совместного движения приводов φ и r , когда координата r должна уменьшаться, алгоритм оптимального совместного управления этими приводами будет соответственно другим. В этом случае следует, наоборот, максимально задержать начало поворота колонны относительно движения стрелы.

Что касается привода подъема z , то, поскольку между ним и приводами φ и r взаимное влияние отсутствует, момент его включения, когда требуется движение и по z , должен выбираться с соблюдением одного условия: это движение должно закончиться к моменту окончания движений двух других приводов, не увеличивая общую длительность цикла движения манипулятора.

Рассмотрим теперь особенности оптимального с точки зрения быстродействия совместного управления двумя подобными манипуляторами. Пусть это будет, например, операция обслуживания роботом прессы холодной штамповки (рис. 6.2). Робот ПР левым манипулятором берет очередную заготовку из магазина М1 и кладет ее в пресс. Одновременно правый манипулятор робота вынимает из прессы отштампованное изделие и кладет его в магазин М2. При этом, как показано на рис. 6.2, приводы каждого манипулятора осуществляют по 6 движений:

1. Выдвижение и захват объекта манипулирования.
2. Втягивание.
3. Поворот по часовой стрелке.
4. Выдвижение с освобождением объекта.
5. Втягивание.
6. Поворот против часовой стрелки в исходную позицию.

Одновременно в крайних позициях может потребоваться вертикальное перемещение манипуляторов.

Исходя из рассмотренного ранее взаимовлияния приводов поворота колонны и выдвижения стрелы, алгоритм оптимального по быстродействию управления обоими манипуляторами заключается в следующем: втягивание одного манипулятора должно начинаться одновременно с его поворотом, а начало выдвижения другого манипулятора должно быть задержано настолько, чтобы оно заканчивалось одновременно с поворотом.

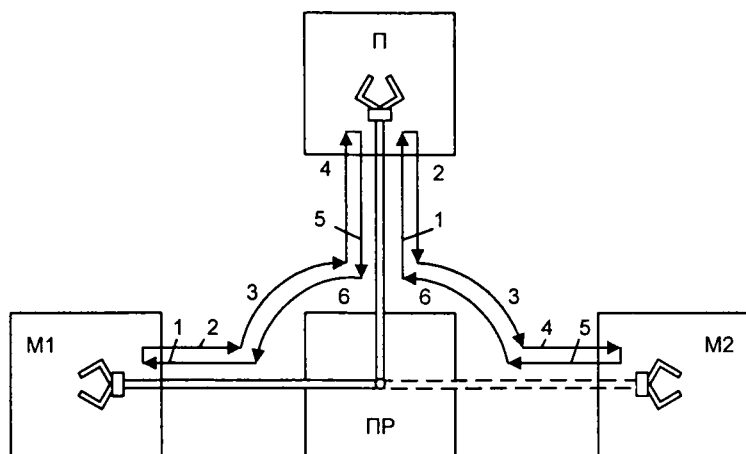


Рис. 6.2. Схема технологической ячейки холодной штамповки: П — пресс; ПР — промышленный робот с двумя манипуляторами; M1 и M2 — магазины

Синтез управляющих программ для систем циклового управления сводится к определению величин оптимальных выдержек времени между моментами включения приводов и соответствующего значения минимального времени всего цикла работы при выполнении конкретной технологической операции. Это осуществляется с помощью компьютерного моделирования на основе математического описания динамики манипуляторов робота. При этом варьируется величина задержки включения приводов и вычисляется длительность всего цикла работы робота. В результате находятся зависимость длительности цикла от величины задержки и оптимальное значение последней, соответствующее минимальной длительности цикла.

6.4. Резонансные цикловые приводы

Приводы и основанные на них манипуляторы этого типа — пример положительного использования упругости. В цикловой привод вводится пружина, которая растягивается (раскручивается) при движении привода в одном на-

правлении из среднего положения и сжимается при движении в другом. В результате привод совершает свое циклическое движение в режиме резонансных незатухающих колебаний с нулевой скоростью в крайних точках. При этом двигатель привода осуществляет подпитку пружины энергией в середине пути при максимальной скорости движения, восполняя потери на выполняемую приводом работу. В конечной точке движения не происходит удара об упор с рассеянием накопленной приводом кинетической энергии. В результате резко, в 3—4 раза снижается энергопотребление и соответственно может быть уменьшена мощность используемого в приводе двигателя за счет неизбежного снижения быстродействия.

Приводы такого типа и основанные на них манипуляторы для промышленных роботов были созданы в Институте машиноведения РАН под руководством А. И. Карендясева и не имеют аналогов по своим энергетическим характеристикам и массогабаритным параметрам [10].

По существу, здесь реализована идея рекуперации энергии, ранее рассеиваемой при торможении, которая традиционно используется, например, на транспорте (маховики, отдача электроэнергии в сеть при переходе электрической машины из двигательного режима в генераторный и т. д.).

ГЛАВА 7

ДИСКРЕТНОЕ ПОЗИЦИОННОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

7.1. Особенности дискретного позиционного управления

Типовые примеры роботов с дискретным позиционным управлением — это промышленные роботы для точечной сварки (рис. 7.1), сборки (см. рис. 3.5) и для обслуживания металлорежущих станков и другого технологического оборудования.



Рис. 7.1. Промышленный робот для контактной сварки R2000iB/200EW (Fanuc, Япония)

Такие роботы имеют большое число — десятки точек позиционирования рабочего органа благодаря применению позиционных приводов.

Процесс перемещения на очередной шаг, как и в цикловых приводах, состоит из этапов разгона, движения с постоянной скоростью и торможения (см. рис. 6.1), однако в отличие от цикловых приводов здесь точность позиционирования, а также устойчивость и качество переходного процесса должны обеспечиваться замкнутой обратными связями системой управления приводами (см. рис. 4.1). (Исключение составляют получившие небольшое распространение в робототехнике разомкнутые позиционные приводы на шаговых двигателях.) Таким образом, принципиальным отличием роботов с дискретным позиционным управлением от цикловых является необходимость обеспечения за счет управления требуемого качества позиционирования.

Другое отличие — это значительно бóльшая роль взаимовлияния приводов. Если в цикловых системах оно, как было показано, может повлиять только на быстродействие, то в позиционных взаимовлияние приводов сказывается на всех показателях системы, включая точность.

Позиционные системы также значительно чувствительнее к нестационарности параметров и влиянию внешних возмущений, чем цикловые, поскольку последние являются разомкнутыми релейными системами.

7.2. Дискретное позиционное управление отдельным приводом

Основной вариант алгоритма дискретного позиционного программного управления приводом соответствует структурной схеме следящей системы, показанной на рис. 4.1, которая последовательно отрабатывает заданные приращения управляемой выходной координаты q_i . Эта схема может быть дополнена другими средствами коррекции, компенсирующими воздействия внешних возмущений и, прежде всего, нагрузки.

Синтез оптимального алгоритма управления при необходимости обеспечить максимальное быстродействие, как уже отмечалось в главе 6, приводит к релейному управлению. Однако, поскольку такая система двухпозиционного релейного управления неустойчива в малом, при подходе к точкам позиционирования необходимо переходить на другой алгоритм управления. В результате получается система так называемого *дуального управления* с переменной структурой, показанная на рис. 7.2. Устройство управления непрерывного действия включается вблизи очередной точки позиционирования, т. е. при малом рассогласовании $\Delta q = q - q_3$, обеспечивая устойчивость и качественную остановку в заданной точке, а устройство релейного управления включа-

ется в момент подачи программного задания на очередной шаг и также при возникновении больших рассогласований, вызванных любыми причинами. (Коммутирующий элемент КЭ показан на рис. 7.2 условно. Он может быть реализован, например, и с помощью управляемых ключей, осуществляющих нужного знака форсировку двигателя в соответствующие интервалы времени.)

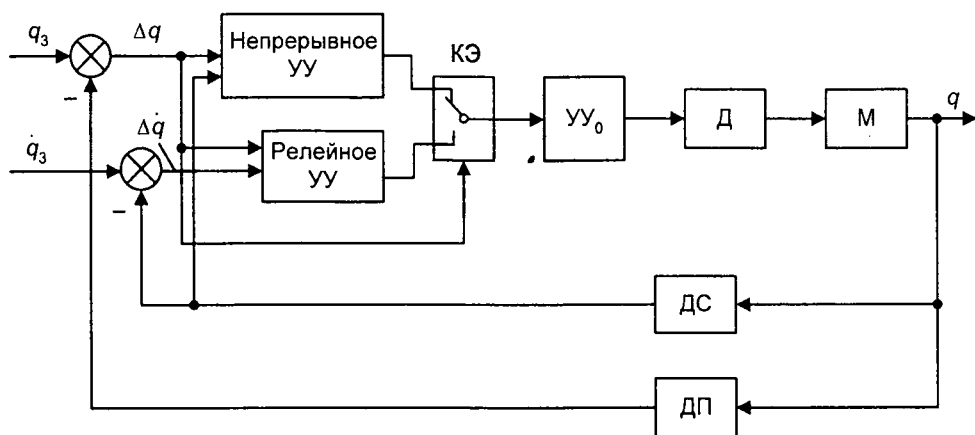


Рис. 7.2. Схема системы дуального управления приводом:
КЭ — коммутирующий элемент

Рассмотрим алгоритмы релейного управления, а затем вернемся к каналу непрерывного управления. На рис. 7.3 показан процесс такого оптимального по быстродействию релейного управления электрическим приводом, описываемый двумя дифференциальными уравнениями первого порядка с ограничениями по входному напряжению и по движущему моменту, т. е. по току. В соответствии с теорией оптимального управления оптимальный алгоритм управления напряжением на входе привода состоит из трех интервалов: на первом из которых предельное значение имеет момент двигателя $M_d = M_{д пр}$, на втором — напряжение на его входе (на якоре) $u = u_{пр}$ и на третьем — опять M_d , но уже с обратным знаком $M_d = -M_{д пр}$.

На рис. 7.3, а на фазовой плоскости сплошными линиями показаны оптимальные по быстродействию процессы движения при отработке задания φ_3 при ограничении по движущему моменту $M_d = C_M I$. Они состоят из парабол, выходящих из начальных точек $(\varphi_3, 0)$ на оси абсцисс, и общей параболы, описывающей этап торможения, — линии переключения. (Пунктиром показан процесс, соответствующий наличию ограничения еще и скорости. Напомним, что момент и скорость связаны механической характеристикой двигателя.)

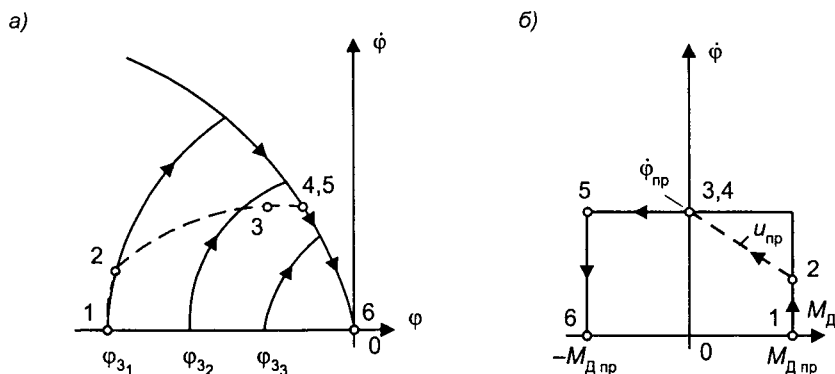


Рис. 7.3. Фазовые траектории (а) и механические характеристики (б) электропривода с релейным позиционным управлением: φ — угол поворота выходного вала двигателя; M_d — движущий момент; $u_{пр}$ — предельное значение напряжения на входе двигателя

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и управлением по напряжению на якоре ограниченные переменные связаны с напряжением на якоре известными выражениями:

$$\left. \begin{aligned} u &= I R - C_E \Phi, \\ M_d &= C_M I. \end{aligned} \right\}. \quad (7.1)$$

Здесь I — ток в цепи якоря двигателя, имеющий ограничение $|I| \leq I_{пр}$, которое определяет предельное значение момента $M_d \leq M_{дпр} = C_M I_{пр}$, где C_M — коэффициент электромагнитного момента; C_E — коэффициент противо-э.д.с. двигателя, R — активное сопротивление цепи якоря двигателя.

Уравнение линии переключения выглядит так:

$$\Psi(\dot{\varphi}, \varphi) = 0,$$

где $\Psi(\dot{\varphi}, \varphi)$ — функция переключения.

Для $R I_{пр} \leq u_{пр}$

$$\Psi(\dot{\varphi}, \varphi) = \varphi_3 - \varphi - K \dot{\varphi}^2 \operatorname{sign} \dot{\varphi}, \quad (7.2)$$

где $K = \frac{J_H + i^2 J_d}{2i M_{дпр}}$, i — передаточное отношение редуктора привода, а J_H и

J_d — моменты инерции нагрузки и якоря двигателя.

Алгоритм управления двигателем представляет собой двухпозиционное релейное управление с входным сигналом $\pm u_{\text{пр}}$. Знак этого сигнала определяется знаком функции переключения (7.2). Ограничение тока при этом осуществляется с помощью обратной связи по току. При достаточно сильной этой связи ток, а следовательно, и момент двигателя будут практически безынерционно следовать за входным напряжением u , реализуя режим моментного управления двигателем.

Отрезок 1—2 на рис. 7.3 соответствует этапу разгона с постоянным ускорением, т. е. при $M_{\text{д}} = M_{\text{д пр}}$; участок 2—3 — продолжение этапа разгона, но при $u = u_{\text{пр}}$, когда с ростом противо-э.д.с. напряжение на якоре достигло своего предельного значения; 3—4 — этап движения с постоянной скоростью, который может возникать при достаточно большой длительности процесса разгона в прежнем режиме ограничения u ; 4—5 — момент перехода к этапу торможения реверсированием тока якоря и соответственно момента; 5—6 — этап торможения при $M_{\text{д}} = -M_{\text{д пр}}$.

Неизбежные погрешности реализации описанного оптимального алгоритма управления затягивают переходный процесс: при завышении значения коэффициента K в выражении функции переключения (7.2) растет монотонность и длительность переходного процесса вследствие недоиспользования двигателя, а в противоположном случае возникает колебательность с перегрузкой двигателя.

Если в приводе имеются существенные упругие деформации, алгоритм оптимального по быстродействию релейного управления осложняется увеличением числа переключений релейного входного сигнала. В этом случае применяются упрощенные квазиоптимальные алгоритмы, приводящие к некоторой потере быстродействия и сводящиеся (как и при жестком приводе) тоже к трем этапам управления: разгону с предельно допустимым ускорением вплоть до предельной скорости при достаточно большом заданном перемещении, движению с постоянной скоростью и предельно быстрому торможению. Оптимизации при этом подлежат только моменты перехода от одного этапа к другому, что реализуется выбором функции переключения.

Вернемся теперь к каналу непрерывного управления, переход к которому от релейного управления осуществляется при подходе к точке позиционирования. Заметим, что вследствие малости отклонения от точки позиционирования исследование этого канала можно проводить с применением уравнений, линеаризованных относительно этой точки.

Главная трудность синтеза алгоритма такого управления связана с нестационарностью параметров нагрузки механической системы манипулятора, т. е.

с изменением параметров последнего при изменении его конфигурации, при перемещении его рабочего органа по программной траектории.

Принципиально здесь возможны 2 пути решения:

- ❑ применение средств динамической коррекции, обеспечивающих необходимый размер области требуемого качества управления;
- ❑ подстройка устройства управления привода под меняющиеся параметры его нагрузки и другие возможные возмущения.

В последнем варианте имеются следующие способы подстройки:

- ❑ по программе, рассчитанной заранее по заданному программному движению, т. е. в функции от времени;
- ❑ в функции от текущего значения задающего воздействия $q_3(t)$;
- ❑ то же, но в функции от фактического значения $q(t)$, поскольку в точках позиционирования практически эти значения совпадают;
- ❑ адаптивная подстройка в функции от значения выбранного показателя качества.

На рис. 7.4 приведена функциональная схема системы управления привода для второго варианта подстройки по q_3 . Подстройка осуществляется дискретно по мере накопления изменений параметров по заранее рассчитанным и закладываемым в блок настройки БН зависимостям значений коэффициентов настройки устройства управления k_1 и k_2 от значения q_3 .

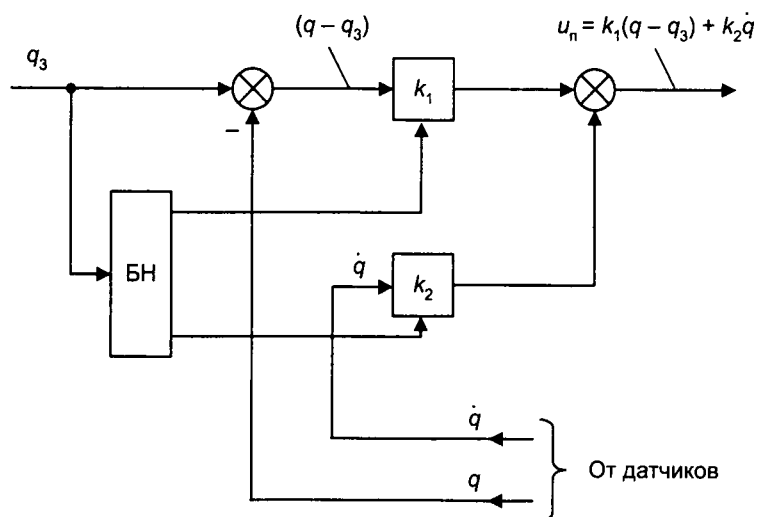


Рис. 7.4. Функциональная схема подстройки привода в функции от q_3 :
БН — блок настройки

Специфическое требование к системам адаптивной подстройки приводов манипуляторов — требование к быстродействию: необходимо, чтобы корректировка качества управления осуществлялась в ходе каждого движения манипулятора, а не в результате усреднения показателей качества за несколько одинаковых программных движений. Поэтому из многих вариантов способов такой подстройки в робототехнике основное применение получила схема с *эталонной моделью*. На рис. 7.6 показан один из вариантов такого формирования адаптером сигнала подстройки. В блоке "Эталонная модель" заложена математическая модель объекта с выбранными в качестве эталона численными значениями его параметров. Сам объект представляет собой механическую систему, на которую воздействует подстраиваемый привод усилием Q_d . По получаемым с датчиков обратной связи привода значениям выходных переменных объекта путем решения обратной задачи динамики определяется усилие $Q_{дэ}$, которое соответствует эталонным параметрам объекта. Разность $\Delta Q = Q_d - Q_{дэ}$ соответствует отклонению объекта от его эталонной модели. Эта разность подается на блок настройки БН для изменения настройки привода, устраняющего это отклонение. Общее рассмотрение адаптивного управления будет дано в главе 9.

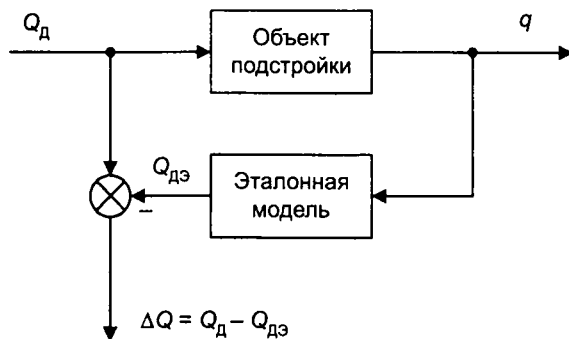


Рис. 7.6. Схема формирования сигнала адаптивной подстройки с эталонной моделью

Возможные упругие деформации негативно сказываются на процессе управления, создавая колебания и затягивая процесс позиционирования. Способы борьбы с этим были рассмотрены в пункте 5.2.3. Определенные возможности по уменьшению упругих деформаций возникают, когда требования к быстродействию достаточно ослаблены. В этом случае можно существенно уменьшить возникающие при торможении упругие колебания за счет удлинения этого процесса и соответствующего снижения ускорений.

Процесс релейного управления до включения канала непрерывного управления перед остановкой привода также существенно влияет на остаточную

упругую колебательность. За счет выбора алгоритма релейного управления в ряде случаев удастся практически полностью подавить эти колебания.

Если требования по быстродействию невысоки и не требуется оптимизация по быстродействию, т. е. их может обеспечить система непрерывного управления, релейное устройство управления оказывается ненужным и система управления позиционными приводами сводится к одноканальной. Однако при этом, поскольку данная система управления работает в течение всего процесса очередного движения от точки к точке, при ее исследовании может оказаться, что уже нельзя прибегать к линеаризации. Кроме того, упругие колебания здесь будут влиять на систему и в начале движения, на этапе разгона. Правда, т. к. при позиционном управлении траектория движения между точками позиционирования не регламентируется, эти колебания должны учитываться только, если они не успевают затухнуть к концу шага.

7.3. Совместное дискретное позиционное управление приводами манипулятора

Это второй уровень управления манипулятором, который при программном управлении осуществляет координированное управление приводами отдельных степеней подвижности, обеспечивающее перемещение рабочего органа манипулятора по последовательности точек, заданных в виде программной дискретной траектории с остановкой в каждой точке в заданные моменты времени t_k . Этот алгоритм реализуется подачей на приводы заданий в виде дискретных программ $q_3(t_k)$, которые находятся по $x_{p3}(t_k)$ решением обратной задачи кинематики для манипулятора:

$$q_3(t_k) = f^{-1}[x_{p3}(t_k)].$$

Эти задания даются в виде последовательности приращений относительных координат

$$\Delta q_3 = q_3(t_k) - q_3(t_{k-1})$$

и времени отработки каждого такого шага

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}.$$

В результате отработки всеми приводами очередного шага рабочий орган манипулятора переместится в следующую точку дискретной программной траектории с заданной ориентацией.

В отличие от рассмотренного ранее процесса управления отдельным приводом при таком одновременном управлении всеми приводами необходимо

учитывать их взаимовлияние через общую механическую систему манипулятора, на которую они работают (см. пункт 5.2.2). Поскольку речь идет о программном управлении, это взаимовлияние можно учесть при программировании путем корректировки программ и программного изменения настройки систем управления приводов.

Рассмотрим, как зависит взаимовлияние приводов от характера их относительного движения и как можно за счет корректировки этих движений при необходимости ослабить такое влияние. На рис. 7.7 приведена двухкоординатная дискретная траектория, реализуемая соответственно с помощью двух приводов по этим координатам q_1 и q_2 . Время t здесь является параметром.

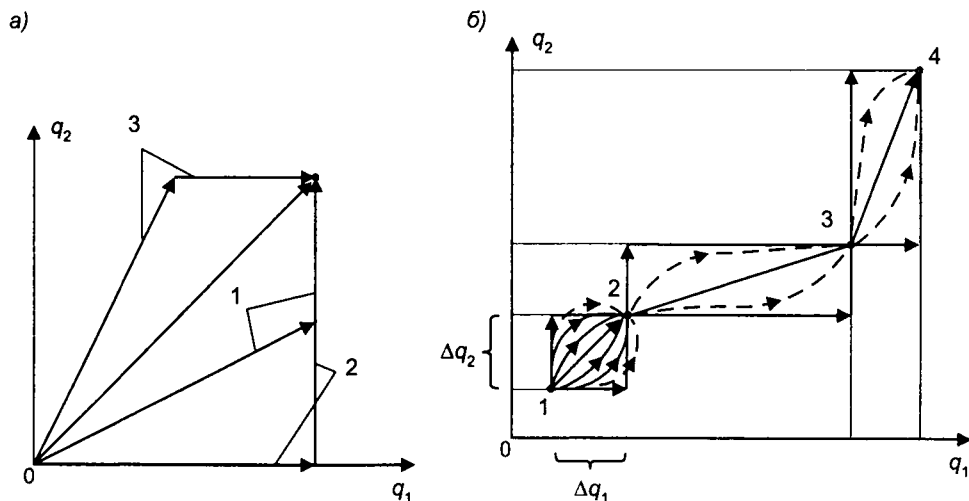


Рис. 7.7. Двухкоординатные дискретные траектории позиционного программного управления: а — кинематический режим (малые скорости); б — динамический режим

Рассмотрим вначале процесс управления на кинематическом уровне, т. е. при достаточно малых скоростях движения, когда можно не учитывать инерцию. На рис. 7.7, а показаны варианты траекторий между программными точками, соответствующие разным соотношениям скоростей приводов. При увеличении скорости первого привода относительно второго траектория опускается (линия 1) в пределе до ломаной линии, состоящей из горизонтального и вертикального участков (линия 2). При увеличении скорости второго привода траектория будет, наоборот, подниматься вверх (линия 3). Очевидно, что траектория будет прямой линией при выборе значений скоростей приводов пропорционально заданным им перемещениям. В этом случае оба привода одновременно закончат свое движение и остановятся, а траектория будет иметь минимальную длину.

При этом взаимовлияние приводов в динамике будет минимальным. Действительно, если приводы тормозятся одновременно, соответственно будет снижаться и возможное их влияние друг на друга при их позиционировании в заданных точках. Если, например, как показано на рис. 7.7, б, перемещение из точки 1 в точку 2 происходит по вогнутой траектории, первый привод начнет тормозиться, когда второй движется еще с наибольшей скоростью. В результате качество позиционирования первого привода может быть ухудшено возмущениями со стороны второго привода. Таким образом, чтобы минимизировать взаимовлияние приводов при их позиционировании, следует при программировании устанавливать на каждом шаге движения их скорости пропорционально заданным перемещениям.

Этот вывод сделан при пренебрежении инерцией приводов. Ее влияние и различие в динамических характеристиках приводов скажутся на траекториях, как показано на рис. 7.7, б, вплоть до "забросов" траекторий за пределы прямоугольников, ограниченных вертикальными и горизонтальными линиями (пунктирные траектории между точками 1 и 2). Поэтому в этом общем случае с учетом динамики приводов для обеспечения одновременного торможения приводов могут потребоваться другие соотношения их программных скоростей, отличные от пропорциональных перемещениям как при кинематическом подходе.

Если выбором программных движений приводов свести к минимуму их взаимовлияние, система программного управления манипулятора распадается на практически автономные системы управления отдельных приводов, рассмотренные в параграфе 7.2. Выявленное, например, при компьютерном моделировании какое-то достаточно существенное нежелательное взаимовлияние приводов можно скомпенсировать перекрестными корректирующими связями, как показано в пункте 5.2.2.

7.4. Общий порядок исследования динамики и синтеза алгоритмов дискретного позиционного программного управления

Этот порядок состоит из следующих этапов:

1. Составление математической модели механической системы и неварьируемых частей приводов, реализованной в виде компьютерной модели.
2. Анализ этой модели управления с целью определения диапазонов возможного изменения его параметров, гибких деформаций и взаимовлияний степеней подвижности.

Имеются в виду диапазоны изменения параметров механической системы и полезного груза, в рамках которых должно быть обеспечено требуемое качество управления. Аналогично учитываются взаимовлияния приводов, заданием диапазонов соответствующих возмущений.

3. Декомпозиция системы управления путем разбиения ее на системы управления отдельных приводов и их автономный синтез.
4. Синтез алгоритма общесистемного уровня управления системой приводов манипулятора.
5. Анализ влияния неучтенных ранее нелинейностей и других особенностей системы, включая взаимовлияния и гибкие деформации с корректировкой ранее полученных решений.
6. Выбор и отработка способа программирования системы управления. Управляющая программа, реализующая требуемую дискретную траекторию движения рабочего органа манипулятора, может быть синтезирована двумя способами. Первый способ заключается в решении обратной задачи кинематики манипулятора на основе его компьютерной модели. Вторым способом — это обучение со стороны человека-оператора. Последний, управляя последовательно отдельными приводами манипулятора через его устройство управления, выводит рабочий орган манипулятора в заданные точки позиционирования и заносит в память устройства управления соответствующие показания датчиков положения приводов. Совокупность этих данных и составит управляющую программу, которая затем и воспроизводится.

ГЛАВА 8

НЕПРЕРЫВНОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

8.1. Особенности непрерывного (контурного) управления роботами

Типичные роботы с непрерывным, т. е. контурным управлением — это промышленные роботы для нанесения покрытий, для дуговой сварки и резки. На рис. 4.7 и 8.1 показаны примеры таких роботов. Их главное отличие от роботов с дискретным позиционным управлением заключается в непрерывном движении рабочего органа манипулятора по траектории. Сама программная траектория при этом может задаваться и в виде дискретной функции времени, т. е. последовательности точек, но рабочий орган проходит эти точки без остановок, как это происходит при дискретном позиционном управлении.

Отсюда принципиальное отличие систем непрерывного управления от дискретных позиционных в отношении динамики. Если в дискретных позиционных системах существенна только статическая точность в точках позиционирования, то в непрерывных требуется динамическая точность движения по заданной траектории. Соответственно, если в дискретных позиционных системах устойчивость и качество переходных процессов оцениваются только в этих точках, при непрерывном управлении необходимо соответственно обеспечить эти требования тоже непрерывно по всей траектории движения.

В непрерывных системах тоже может применяться дуальное управление, как и в дискретных, в виде сочетания непрерывного управления с релейным при больших отклонениях от задания. Однако если в системах дискретного управления основное время движения приходится на релейное управление, а переход к непрерывному управлению осуществляется только вблизи точек позиционирования, в системах непрерывного управления основным режимом соответственно является непрерывное управление, а переход к релейному

осуществляется эпизодически при возникновении больших отклонений от программной траектории движения.

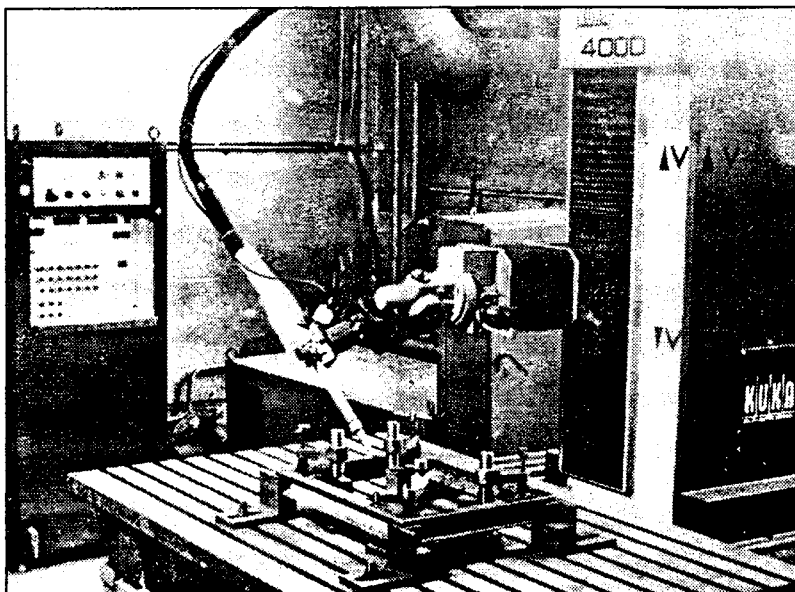


Рис. 8.1. Электрический промышленный робот для дуговой сварки (КУКА, Германия)

Эти особенности систем непрерывного управления приводят к принципиальному отличию их программирования по сравнению с дискретными позиционными системами. В дискретных позиционных системах управляющая программа, которая обрабатывается приводами, — это программная последовательность точек позиционирования, в которых должна происходить остановка приводов. Для непрерывных систем управления программная траектория и реализующая ее управляющая программа оказываются разными понятиями, которые могут совпадать только в частных случаях. Действительно, если подать на приводы манипулятора программные траектории $q_3(t)$, рассчитанные по заданной программной траектории его рабочего органа $x_{p3}(t)$ путем решения обратной задачи кинематики

$$q_3(t) = f^{-1}[x_{p3}(t)],$$

то их отработка произойдет с неизбежным динамическим запаздыванием, как это показано на рис. 8.2. Соответствующая ошибка Δq , очевидно, будет тем больше, чем выше скорость движения.

Способы ее снижения известны из теории автоматического управления. Во-первых, поскольку речь идет о программном управлении, эту ошибку можно

устранить добавкой к программной траектории заранее рассчитанной динамической коррекции, которая должна скомпенсировать указанное динамическое запаздывание. В результате, как показано на рис. 8.3, приводы будут обрабатывать управляющие программы

$$G(t) = q_3(t) + \Delta_k(t),$$

где $\Delta_k(t)$ — динамическая коррекция.

Эту управляющую программу можно рассчитать путем решения обратной задачи динамики по математическому описанию манипулятора с приводами

$$\left. \begin{aligned} A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) &= Q_d, \\ Q_d &= A_n(U_n). \end{aligned} \right\}$$

Подставив сюда вместо $q(t)$ заданную программную траекторию $q_3(t)$, найденную по $x_{p3}(t)$ решением обратной задачи кинематики, находим искомую управляющую программу $U_{п3}(t)$.

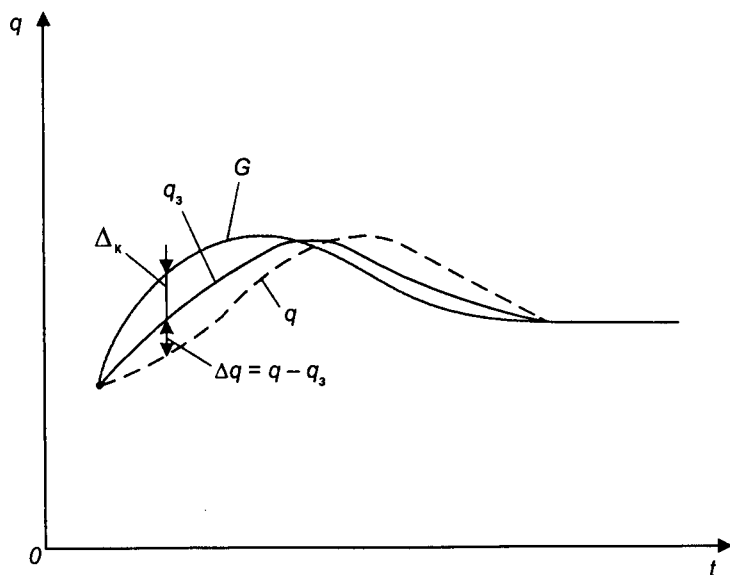


Рис. 8.2. Динамическое запаздывание $q(t)$ при обработке программной траектории $q_3(t)$

Управляющую программу можно находить и экспериментально методом обучения на реальном роботе. Существуют два способа такого обучения. Первый — путем непрерывного перемещения рабочего органа манипулятора рукой оператора с записью сигналов с датчиков обратной связи приводов.

Для того чтобы двигатели манипулятора не препятствовали этому, его конструкция должна предусматривать возможность их отсоединения от механической системы манипулятора (с сохранением соединения с ней датчиков обратной связи).

Развитием этого способа программирования методом обучения стало применение в них современных способов управления манипуляторами человеком-оператором (см. главу 10). Так, программирование путем перемещения рабочего органа манипулятора рукой оператора может осуществляться с помощью трехступенной задающей рукоятки, которая укрепляется на время программирования на рабочем органе манипулятора. Оператор, смещая эту рукоятку с нейтрального положения в нужном направлении, осуществляет перемещение рабочего органа манипулятора, управляя с помощью контактов задающей рукоятки приводами манипулятора через его устройство управления. В таком варианте этот способ программирования применим ко всем манипуляторам и не требует отсоединения двигателей приводов как в его исходном варианте.

Второй способ заключается в последовательной установке рабочего органа манипулятора с помощью приводов в точках, заранее выбранных на программной траектории с записью показаний датчиков обратной связи приводов, как при программировании систем дискретного позиционного управления. Управление приводами манипулятора при этом осуществляется через его устройство управления обычно с помощью переносного пульта. Для повышения точности и быстродействия при таком программировании на рабочий орган манипулятора укрепляется передающая телевизионная камера, дающая крупным планом на экран персонального компьютера изображение объектов внешней среды, с которыми манипулятор должен взаимодействовать.

Для формирования заданной траектории между запрограммированными точками при воспроизведении необходимого непрерывного движения используется интерполятор. Необходимая динамическая коррекция при программировании таким способом подбирается экспериментально путем многократного пробного воспроизведения требуемой траектории за заданное время.

Другой путь уменьшения динамической ошибки — это повышение быстродействия самой системы автоматического управления введением в нее динамической коррекции, которая будет формироваться непосредственно в ходе отработки подаваемой на вход системы заданной программной траектории. Конечно, этот путь значительно сложнее, поскольку мы игнорируем априорное знание подлежащей реализации траектории, но с другой стороны, он упрощает программирование робота, сводя его к кинематическому синтезу программной траектории для приводов.

В целом различают два варианта программирования систем непрерывного управления — кинематическое и динамическое. Первый вариант соответствует малым скоростям движения рабочего органа (примерно менее 0,5 м/с), когда динамической погрешностью отработки программной траектории при имеющемся быстродействии системы управления можно пренебречь. Второй вариант относится к большим скоростям, когда необходимо вводить динамическую коррекцию в управляющую программу, т. е. при аналитическом ее расчете решать обратную задачу динамики, а не кинематики как в первом случае.

8.2. Непрерывное управление отдельным приводом

Типовая схема привода с непрерывным управлением такая же, как и при дискретном позиционном управлении (см. рис. 4.1). Однако, как показано ранее, режим ее работы и соответственно основные требования к ней совершенно другие, поскольку система непрерывного действия должна непрерывно поддерживать соответствие заданию не только по перемещению q , но и по его скорости $\dot{q}$.

Для уменьшения отклонений от программной траектории при больших возмущениях, как уже отмечалось, эта система непрерывного управления может быть дополнена релейной приставкой, подключающейся при определенной величине рассогласования $\Delta q_i = q_i - q_{iz}$. Порядок синтеза алгоритма работы такой приставки был изложен в *параграфе 7.2*.

Рассмотрим алгоритмы динамической коррекции привода, обеспечивающие необходимую компенсацию ошибки воспроизведения заданной программной траектории. Принципиально возможны следующие способы такой коррекции:

- ☐ коррекция программной траектории;
- ☐ последовательная коррекция в прямом канале входного воздействия;
- ☐ параллельная коррекция в канале обратной связи по ошибке воспроизведения входного сигнала.

Первый способ был рассмотрен в предыдущем *параграфе 8.1* и применим только в системах программного управления. Далее будут рассмотрены следующие два способа динамической коррекции, имеющие более общее применение не только в системах программного управления.

8.2.1. Непрерывное управление приводом с последовательной коррекцией

Последовательное корректирующее звено (рис. 8.3) должно осуществлять компенсацию инерционности и неидеальности привода, в результате чего должно обеспечиваться равенство $q = q_3$. Поэтому данное звено часто называют *компенсатором*. Очевидно, если оператор этого звена A_K будет обратен оператору привода, т. е. $A_K = A_n^{-1}$, то общий оператор привода с компенсатором $A_K A_n = 1$ и привод будет без искажения повторять на выходе q входной сигнал q_3 , разумеется, с конечной точностью, определяемой точностью соответствия оператора A_K реальному приводу.



Рис. 8.3. Последовательная динамическая коррекция привода

8.2.2. Непрерывное управление приводом с коррекцией с помощью обратных связей

Перейдем теперь ко второму способу динамической коррекции с помощью обратных связей. По существу, в типовой схеме привода (см. рис. 4.1) уже есть подобная внутренняя обратная связь по скорости, однако эта коррекция является типовым минимумом, необходимым для обеспечения нужного качества переходных процессов. При достаточно малых скоростях программного движения эта коррекция вполне может оказаться достаточной и для обеспечения интересующей нас сейчас динамической точности отработки входного воздействия. Однако с повышением требований к быстродействию соответственно требуется дополнительная коррекция. Ее алгоритм может быть синтезирован общими методами теории автоматического управления с использованием уже отработанных типовых решений.

Приводы манипуляторов имеют следующие особенности, которые надо при этом учитывать: возможное наличие гибких звеньев, нестационарность нагрузки со стороны механической системы манипулятора и наличие взаимовлияний приводов. Последняя особенность была рассмотрена в пункте 5.2.2, а здесь остановимся на первых двух особенностях.

Упругие деформации и вызываемые ими колебания при непрерывном управлении могут возникать при резких изменениях направления или скорости движения по траектории, а также под влиянием внешних возмущений. При

достаточно плавной траектории и отсутствии значительных возмущений они практически отсутствуют.

Методы борьбы с этими колебаниями уже были рассмотрены в главе 7. В части управления они заключаются прежде всего во введении в устройстве управления привода дополнительных настроечных параметров, специально предназначенных для подавления упругих колебаний. Эта возможность основана на том, что частоты упругих колебаний обычно выше спектра частот программных движений. Поэтому при синтезе алгоритма управления можно вначале считать механическую систему жесткой, а затем, учтя в математической модели гибкие звенья, осуществить синтез контуров с дополнительными варьируемыми параметрами, обеспечивающими частотную отстройку от программного движения.

Дополнительные настроечные параметры реализуются введением демпфирующих обратных связей по упругим деформациям (например, по их скорости, что создает искусственную вязкость), по связанным с ними другими переменными или с применением "наблюдателей", осуществляющих расчет данных деформаций по этим переменным.

Другим тоже уже упоминавшимся способом снижения упругих колебаний является коррекция самих программных траекторий путем их сглаживания, чтобы не возбуждать этих колебаний.

Наконец, иногда можно с этой же целью при резких изменениях программной траектории снижать быстродействие привода программно или с помощью последовательного корректирующего звена, идя при этом на соответствующее увеличение динамической погрешности ради того, чтобы сбить самые большие и продолжительные упругие колебания. В результате в целом погрешность отработки программной траектории может быть существенно снижена.

Рассмотрим вторую указанную ранее особенность — нестационарность параметров нагрузки приводов, которой является механическая система манипулятора, включая полезную нагрузку его рабочего органа. Задача заключается в том, чтобы во всем диапазоне изменения этих варьируемых параметров обеспечить не только устойчивость, но и требуемое качество переходных процессов и точность отработки программной траектории. Способы решения этой задачи известны. Это расширение областей устойчивости и качества в пространстве варьируемых параметров за счет соответствующей коррекции, подстройки устройства управления привода, и, наконец, переходу к принципиально новым алгоритмам управления, обеспечивающим робастность, т. е. структурную нечувствительность качества управления к изменениям параметров системы и другим возмущениям.

Первый способ применим при изменениях варьируемых параметров в достаточно ограниченном диапазоне и поэтому не дает общего решения в отличие от следующих двух. Его реализация требует синтеза алгоритма управления с выбором коррекции, обеспечивающей при фиксированной настройке сохранение требуемого качества управления во всем диапазоне изменения варьируемых параметров.

Следующий способ обеспечения требуемого качества управления при изменении параметров системы — это подстройка привода. Этот способ позволяет обеспечить более высокое качество управления и в большем диапазоне изменения параметров. В непрерывных системах управления применяются те же виды подстройки, что и в дискретных позиционных системах, рассмотренные в параграфе 7.2: программная подстройка, подстройка в функции от q_z или q и адаптивная подстройка (см. рис. 7.4, 7.5). Вместе с тем для непрерывных систем, как значительно более сложных в отношении динамики, предложены и соответственно более совершенные способы подстройки, основанные на алгоритмах искусственного интеллекта, которые будут рассмотрены в главе 9, посвященной системам адаптивного и интеллектуального управления.

8.3. Робастные системы непрерывного управления приводами

Рассмотрим последний из трех перечисленных в пункте 8.2.2 способов управления приводами с существенно нестационарной нагрузкой. *Робастные системы управления* — это системы, у которых структура, т. е. алгоритм управления, обеспечивает принципиальную независимость (инвариантность) качества управления от значения параметров нагрузки и возмущений. Для приводов манипуляторов это означает, прежде всего, нечувствительность к изменениям конфигурации его механической системы, изменениям полезной нагрузки в рабочем органе и к взаимовлияниям приводов. Из этого следует, что такое управление делает приводы для уровня их совместного управления автономными и стационарными.

Далее будут рассмотрены 2 типа таких систем управления, предложенных для систем управления роботами:

- ☐ система управления с обратной связью по ускорению;
- ☐ релейная система управления.

8.3.1. Системы непрерывного управления с обратной связью по ускорению

Ускорение, как известно, является признаком и мерой нарушения баланса сил, действующих на систему, т. е. мерой любого возмущения — внешнего

или внутреннего, включая параметрическое, — нарушающего установившееся состояние системы. Поэтому регулятор с обратной связью по ускорению должен парировать любые возмущения, стабилизируя режим управляемого им объекта. Эта идея была предложена и реализована еще в прошлом веке Сименсами в регуляторе скорости турбины и возродилась в робототехнике как весьма плодотворная для создания робастных систем управления.

На рис. 8.4 приведена основанная на этом принципе схема системы управления приводом, предложенная П. Д. Крутько.

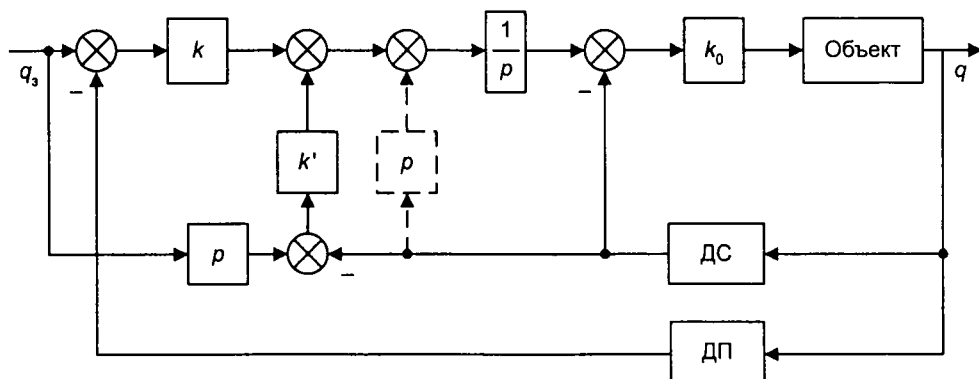


Рис. 8.4. Схема системы управления с обратной связью по ускорению

Здесь обратная связь по ускорению показана пунктиром. Поскольку в прямом канале имеется интегрирующее звено, эквивалентное преобразование исходной схемы путем переноса выхода этой обратной связи за это звено позволяет обойтись без сигнала по ускорению, упростив схему до варианта, изображенного сплошными линиями. Поэтому хотя в окончательном виде схема не содержит обратной связи по ускорению, она реализует именно этот принцип управления. Формально эта схема представляет собой вариант обычного ПИД-регулятора с программно задаваемой уставкой q_3 . При достаточно сильной скоростной обратной связи, эквивалентной в исходной схеме обратной связи по ускорению, последняя будет парировать все возмущения, включая параметрические, поддерживая равенство $q(t) = q_3(t)$.

Описанная схема была синтезирована аналитически как решение задачи обеспечения робастности. Главный результат этого синтеза — методика определения значений настроечных коэффициентов схемы, обеспечивающих робастность по устойчивости и качеству управления. Поясним порядок этого синтеза.

Пусть объект управления описывается дифференциальным уравнением второго порядка произвольного вида, в общем случае нелинейным, нестационарным

нарным и с неизвестными параметрами. От уравнения требуется только одно — разрешимость относительно старшей производной $\ddot{q}$, т. е. возможность представить его в виде

$$\ddot{q} = F(\dot{q}, q, u_{\Pi}), \quad (8.1)$$

где u_{Π} — входное управляющее воздействие на объект. Заметим, что для приводов манипуляторов это всегда выполнимо, т. к. в уравнении (5.14) $\ddot{q}$ — множитель. Для описанной далее процедуры синтеза алгоритма управления требуется, кроме того, чтобы существовала и была положительна производная $\frac{\partial F}{\partial u_{\Pi}}$, что также всегда имеет место, т. к. u_{Π} — входное управляющее воздействие на объект.

Поставим задачу синтезировать алгоритм управления для u_{Π} по условию, чтобы переходные процессы на выходе объекта соответствовали некоторой эталонной модели в виде стационарного линейного объекта второго порядка с желаемым качеством переходных процессов. (Заметим, что для физической реализуемости искомого решения надо, чтобы принятая инерционность этой модели была близка инерционности искомого объекта.) Уравнение переходных процессов в такой эталонной модели имеет вид

$$\ddot{q} + k'\dot{q} + kq = 0.$$

Это уравнение для приращений представим так:

$$\Delta\ddot{q} = F_3(\Delta\dot{q}, q) = -k'\Delta\dot{q} - k\Delta q, \quad (8.2)$$

где $\Delta q = q - q_3$. Отсюда можно записать

$$\ddot{q} = F_3 + \ddot{q}_3. \quad (8.3)$$

Решения поставленной задачи найдем, потребовав, чтобы при $t \rightarrow \infty$ F , т. е. $\ddot{q}$ из (8.1) стремилось к выражению $(F_3 + \ddot{q}_3)$ из (8.3). Это может обеспечить алгоритм астатического управления, соответствующий структурной схеме, приведенной на рис. 8.5, а:

$$u_{\Pi} = k_0 \int_0^t [F - (F_3 + \ddot{q}_3)] dt. \quad (8.4)$$

Здесь с учетом выражений (8.1) и (8.2)

$$u_{\Pi} = \frac{k_0}{p} (\Delta\ddot{q} + k'\Delta\dot{q} + k\Delta q). \quad (8.5)$$

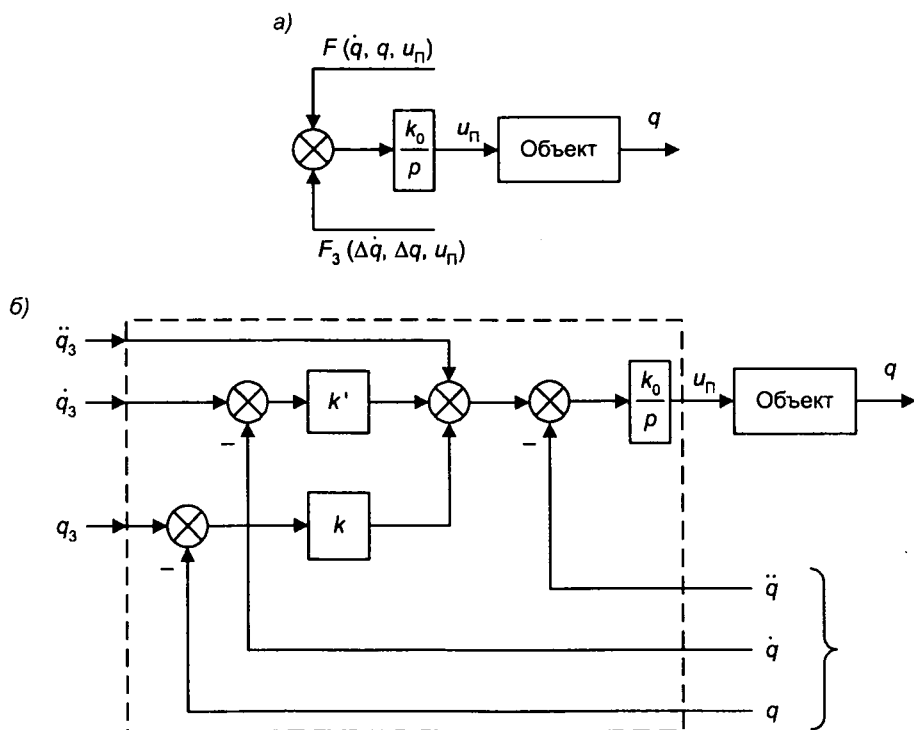


Рис. 8.5. Синтезированная структурная схема управления по ускорению

Соответствующая схема, представленная на рис. 8.5, б, эквивалентным преобразованием путем переноса воздействий по $\ddot{q}$ и $\dot{q}$ за интегрирующее звено приводится к окончательному виду, показанному на рис. 8.4.

Как следует из изложенного, в основе выполненного синтеза лежит идея управления по эталонной модели, когда за счет сильного управления объектом последний ведет себя как эта модель. Этим и обеспечивается независимость качества управления не только от численных значений параметров объекта, но и от его структуры. Действительно, при выводе алгоритма управления вообще не использовалось уравнение объекта управления.

Значения коэффициентов настройки определяются следующими условиями.

- Контур гибкой обратной связи по ускорению (по скорости за интегрирующим звеном) должен иметь быстроедействие в 5–6 раз больше, чем внешний контур по q , чтобы отработка приводом задания $q_3(t)$ происходила на фоне реализуемой гибкой обратной связью робастности привода. Это обеспечивается выбором значения коэффициента k_0 .
- Желаемое качество переходных процессов определяется соотношением коэффициентов k и k' . Последовательная динамическая коррекция в виде

рассмотрим создание того же эффекта робастности с помощью предельно сильной обратной связи по отклонению — релейной обратной связи.

Как известно, отрицательная обратная связь ослабляет влияние всех внешних и внутренних возмущений, включая нестабильность параметров и помехи, и этот эффект растет с усилением обратной связи. При увеличении коэффициента обратной связи в пределе получается релейная обратная связь, которая эквивалентна звену непрерывного действия с коэффициентом передачи, равным бесконечности. Следовательно, такая предельно сильная обратная связь должна соответственно обеспечить и предельную независимость охватываемого ею объекта от любых возмущений, т. е. в рассматриваемом случае — робастность привода.

На рис. 8.7 показана схема такой релейной системы управления привода.

Как и в типовой схеме привода непрерывного действия (рис. 4.1), здесь имеются две обратные связи — по положению q и по скорости $\dot{q}$. Е. С. Пятницким доказана с помощью прямого метода А. М. Ляпунова ее абсолютная устойчивость для объектов второго порядка [12]. Для объектов третьего порядка необходимо соответственно повысить порядок гибкой обратной связи, т. е. перейти к обратной связи по ускорению. Это отражено введением дифференцирующего звена, показанного пунктиром на схеме на рис. 8.7. В манипуляторах такие приводы ведут себя как автономные со стабильным качеством управления при изменении параметров, т. е. действительно являются робастными.

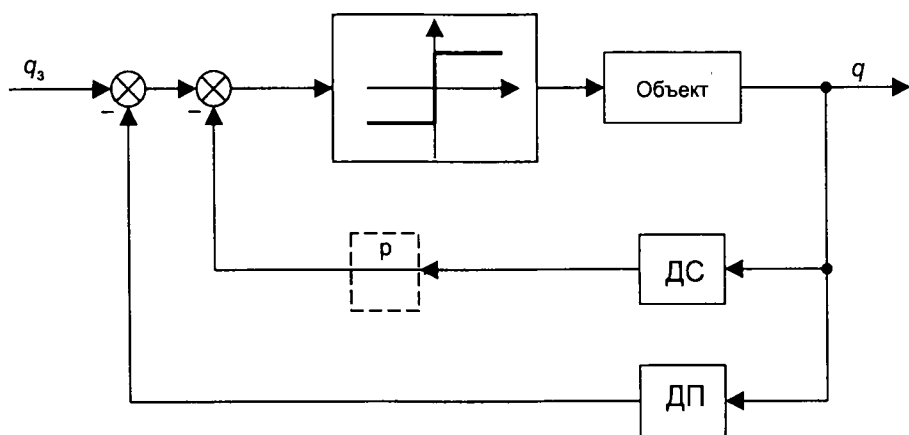


Рис. 8.7. Релейная система управления привода

Поскольку в такого типа системах двухпозиционного релейного управления в установившемся режиме неизбежны автоколебания, здесь необходимо принимать специальные меры для их устранения. Простейшее средство — это

введение в релейную характеристику зоны нечувствительности. Это применимо, когда требование к точности управления допускает статическую ошибку, обусловленную этой зоной нечувствительности. Другой путь — это использование скользящего режима путем повышения за счет соответствующей коррекции и соответственно снижения их амплитуды. При этом возникает задача обеспечения устойчивости скользящего режима во всем диапазоне изменения параметров системы. Кроме этого, релейное управление создает еще одну трудность: при наличии гибких звеньев в системе оно при релейных переключениях двигателя неизбежно возбуждает в приводе упругие колебания, для борьбы с которыми необходимо принимать дополнительные специальные меры.

Общим для рассмотренных робастных систем управления является то, что обеспечиваемая ими независимость качества управления от всех возмущений достигается утяжелением динамического режима управляемого объекта. Поэтому данные способы управления неизбежно отрицательно сказываются на ресурсе приводов. Следовательно, применение их оправдано только в тех случаях, когда без них невозможно выполнить технические требования к динамике системы.

Завершая рассмотрение способов непрерывного управления отдельными приводами, обратим внимание на возможность их совместного применения с целью сложения их достоинств и компенсации недостатков. Так, как уже отмечалось, совместное применение последовательной коррекции и обратных связей позволяет упростить алгоритмы обоих способов, получив при этом качество управления, недостижимое при применении только одного из них.

8.4. Совместное непрерывное управление приводами манипулятора

Это второй уровень управления манипуляторами, основная задача которого — координация его приводов для обеспечения движения рабочего органа манипулятора по заданной траектории. Как уже отмечалось в начале этой главы, в случае непрерывного движения эта задача для системы непрерывного управления манипулятором существенно сложнее, чем в системах дискретного позиционного управления, т. к. здесь необходимо контролировать не только положение рабочего органа, но и вектор его скорости для того, чтобы обеспечить требуемую точность движения по программной траектории.

Алгоритм совместного управления приводами зависит от алгоритмов управления отдельными приводами, возможные варианты которых были рассмотрены в предыдущем *параграфе* 8.3. Если приводы имеют робастные системы

управления, когда они автономны, функция уровня совместного управления сводится к минимуму — к выдаче на приводы программных траекторий $q_{i_3}(t)$. Синтез самих этих траекторий осуществляется на этапе программирования (аналитически, в данном случае, — путем решения обратной задачи кинематики или экспериментально — методами обучения).

Если приводы неробастные, но в них есть динамическая коррекция программного движения, позволяющая подавать на них задания в виде программной траектории $q_{i_3}(t)$, функция уровня совместного управления дополняется только задачей общей коррекции и компенсации взаимовлияния приводов. То же относится и к случаю, когда в приводах нет указанной динамической коррекции, а она вводится в управляющую программу.

Наконец, если нет и последнего, функция второго уровня управления дополняется осуществлением динамической коррекции всей системы приводов.

Рассмотрим способы такой коррекции на общесистемном уровне, т. е. опишем способы коррекции последовательной и с помощью обратных связей, которые ранее были рассмотрены для отдельного привода. Выходными переменными здесь соответственно являются вектор положения рабочего органа x_p или кинематически связанный с ним вектор $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ и вектор усилия на рабочем органе Q_p .

8.4.1. Системы совместного непрерывного управления приводами манипулятора с последовательной коррекцией (с компенсатором)

Рис. 8.8, а иллюстрирует эту задачу. Здесь $A_{мп}$ — известный оператор манипулятора с приводами, A_k — подлежащий определению оператор последовательного звена — *компенсатора*. Найдем выражение для A_k из условия, чтобы обеспечить равенства $q(t) = q_3(t)$. Очевидно, что, по-прежнему, как и при рассмотрении отдельного привода, это будет иметь место, если $A_k A_{мп} = 1$, т. е. при $A_k = A_{мп}^{-1}$. Отсюда можно найти выражение для A_k , решая обратную задачу динамики для манипулятора с приводами, т. е. для системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A(q) p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= Q_d - Q_v, \\ Q_d &= A_n(U_n), \\ U_n &= A_k(q_3), \end{aligned} \right\} \quad (8.6)$$

где A_n — оператор системы приводов.

Подставив в (8.6) $q = q_3$, находим

$$U_{\Pi} = A_{\Pi}^{-1} [A(q) p^2 q_3 + b(pq, q) + c(q)]. \quad (8.7)$$

На рис. 8.8, б приведена соответствующая структурная схема. Здесь значок $\hat{}$ над $A(q)$, $b(pq, q)$, $c(q)$ и A_{Π} означает оценку этих выражений, т. е. принятые в схеме компенсатора их математические модели. Приведенную здесь схему компенсатора можно получить и сразу на основании равенства $A_k = A_{\text{мп}}^{-1}$ как инверсию оператора манипулятора. (На этом основано еще одно название устройства такой коррекции — "инверсный регулятор".)

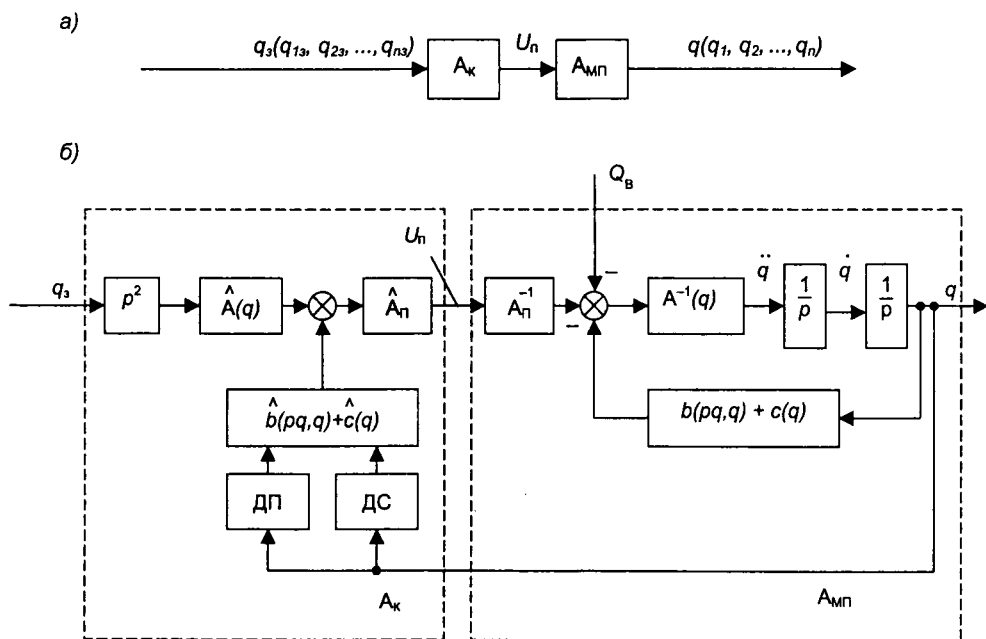


Рис. 8.8. Схема манипулятора с компенсатором

В схеме компенсатора на рис. 8.9, б звено $\hat{A}_{\Pi}^{-1}$ аналогично рассмотренному в пункте 8.2.1 компенсатору привода, но уже в виде инверсии оператора A_{Π} системы всех приводов манипулятора. Звено $\hat{A}(q)$ компенсирует инерционность механической системы манипулятора и взаимовлияния ее степеней подвижности, описываемые этой матрицей, а звено $[\hat{b}(pq, q) + \hat{c}(q)]$ аналогично компенсирует скоростные и гравитационные силы.

Имеющиеся в схеме компенсатора воздействия по $\dot{q}$ и q отражают нестационарность манипулятора, реализуя векторы $\hat{b}(pq, q)$ и $\hat{c}(q)$ как функции этих

выходных переменных, т. е. осуществляют подстройку данного звена. Заметим, что для систем программного управления эта подстройка компенсатора может производиться в виде функции не только векторов $\dot{q}$ и q , но и связанных с ними программной траекторией и q_3 или t , т. е. принципиально в этом случае применимы все способы подстройки, которые были рассмотрены в пункте 8.2.2 для отдельных приводов. Здесь может быть использована и описанная там адаптивная подстройка в функции от контролируемого качества процесса управления, которая будет компенсировать также и неточности математической модели манипулятора.

Воздействие U_n на выходе компенсатора, определяемое выражением (8.7), — это поступающая на приводы управляющая программа, которая формируется компенсатором путем решения обратной задачи динамики для манипулятора, но не заранее, как это описано в параграфе 8.1, а в реальном масштабе времени в темпе поступления на вход системы заданной программной траектории $q_3(t)$.

На рис. 8.9 в качестве примера приведена схема компенсатора для рассмотренного ранее трехзвенного манипулятора с цилиндрической кинематической схемой (см. рис. 3.2) для простоты без учета динамики приводов (см. рис. 5.4). Из степеней подвижности φ , z и r самое простое корректирующее звено получилось в канале z в виде двойного дифференцирующего звена, которое компенсирует механическую инерцию привода J_z . Коррекция в каналах φ и r сложнее из-за наличия их взаимовлияния, описываемого звеньями b_φ и b_r . Их инверсия в компенсаторе формируется с помощью операций умножения и возведения в квадрат.

Компенсатор превращает манипулятор в идеальный объект, без запаздывания повторяющий в своих звеньях программную траекторию $q_3(t)$.

Однако компенсатор как всякое последовательное корректирующее звено имеет следующие недостатки, характерные для всех разомкнутых систем:

- Неточность компенсации, вызванная неизбежной неточностью математической модели объекта, по которой она синтезируется. В частности, компенсатор игнорирует упругие колебания в механической системе манипулятора. Последние возникают на выходе приводов и могут подавляться только путем соответствующего локального управления каждым приводом в отдельности.
- Ухудшение устойчивости скомпенсированного объекта вплоть до неустойчивости при перекомпенсации, поскольку компенсатор в идеале — выводит компенсируемый объект на границу устойчивости, компенсируя его инерционность.

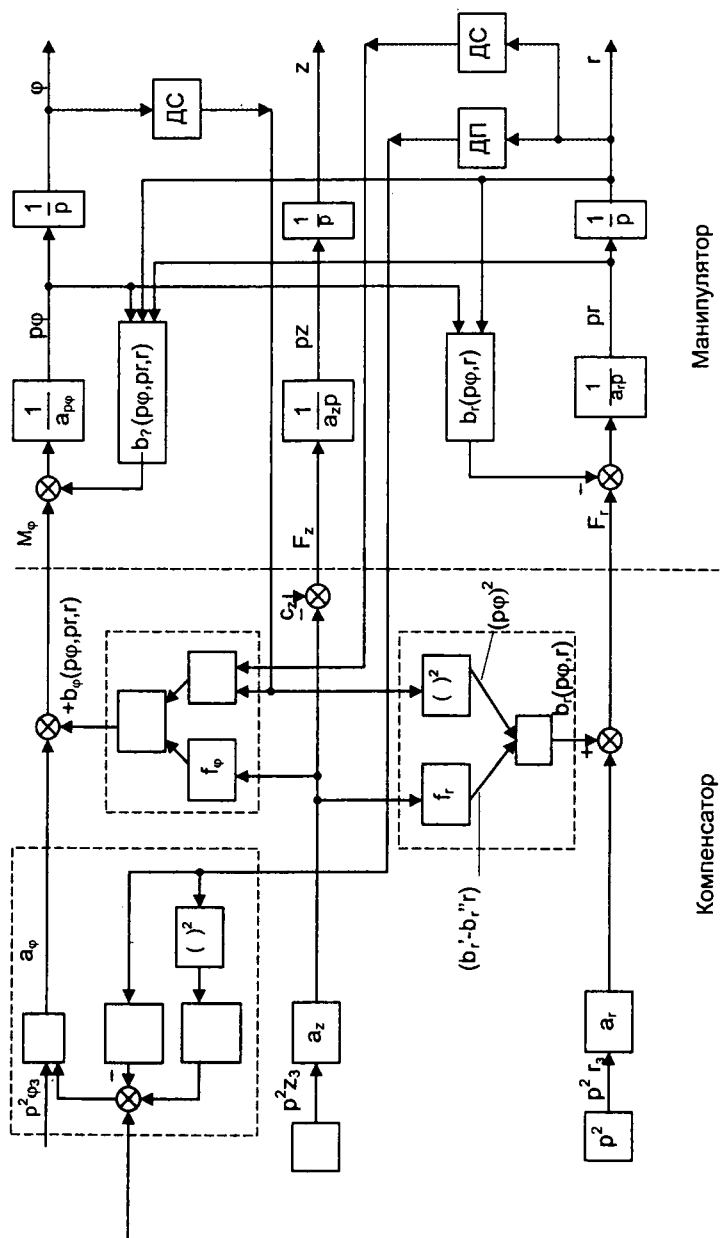


Рис. 8.9. Структурная схема трехзвенного манипулятора с компенсатором

- ❑ Тяжелый динамический режим объекта, обусловленный форсирующим действием компенсатора для преодоления инерционности объекта, и по той же причине повышение уровня помех на входе приводов.
- ❑ Компенсатор выполняет свои функции только при достаточно ограниченных входных воздействиях, при которых приводы манипулятора не выходят в насыщение. Причем форсирующее действие компенсатора способствует этому.

Из изложенного можно сделать следующие выводы.

- ❑ Настройку компенсатора надо делать с запасом, т. е. с недокомпенсацией, заведомо превышающей возможные неточности используемой при его синтезе математической модели объекта.
- ❑ Последовательную коррекцию в виде компенсатора следует рассматривать как средство улучшения динамических свойств объекта управления, а собственно управление должно осуществляться по рассогласованию $\Delta q = q - q_3$, т. е. с помощью устройства управления с отрицательной обратной связью.

На рис. 8.10 приведена схема системы программного управления манипулятором с компенсатором, которая соответствует последнему выводу. Схема включает компенсатор, который, не давая полной компенсации, развязывает приводы, делая их практически автономными, и компенсирует в основном нестабильность их нагрузки, снимая проблему подстройки. Поэтому устройство управления приводами может быть выполнено по простейшей типовой схеме с внутренней скоростной обратной связью по $\dot{q}$ и релейной приставкой, подключаемой при больших рассогласованиях.

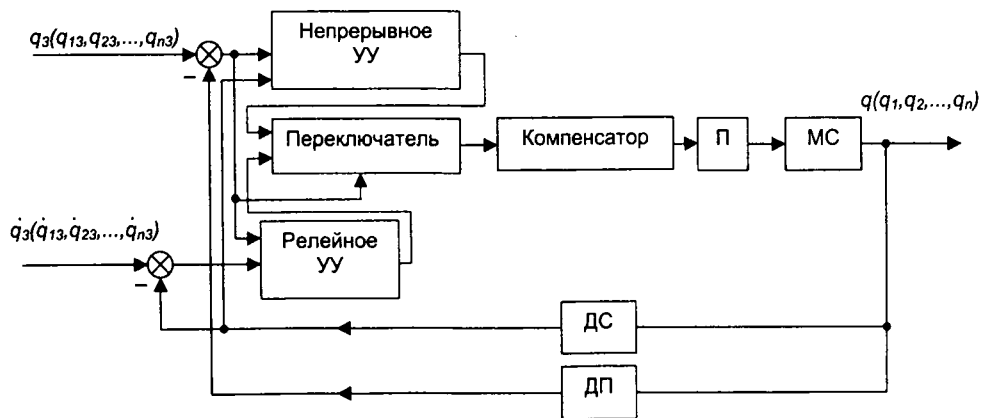


Рис. 8.10. Схема системы непрерывного управления манипулятором:
МС — механическая система; П — приводы

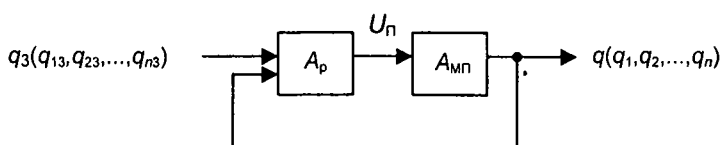
Если проиллюстрировать схему на рис. 8.10 на примере манипулятора с компенсатором на схеме рис. 8.9, то на вход каждого из трех каналов этой схемы надо ввести автономное непрерывное устройство управления по отклонению $\Delta q_i = q_i - q_{i3}$ с обратной связью по $\dot{q}_i$ и с релейной приставкой, действующей в функции этих же сигналов.

8.4.2. Системы совместного управления приводами манипулятора с динамической коррекцией с помощью обратных связей

Рассмотрим теперь возможности динамической коррекции системы управления манипулятором с помощью обратных связей. Задача заключается в синтезе алгоритма такого управления в функции от вектора рассогласования $\Delta q = q - q_3$ и выяснении его возможностей в отношении обеспечения качества отработки q_3 .

Рис. 8.11, а иллюстрирует эту задачу. Здесь A_p — подлежащий определению оператор устройства управления по Δq манипулятора, представленного оператором $A_{мп}$. Такое устройство можно назвать программным регулятором, поскольку его задача — обеспечить устойчивость и требуемое качество удержания рабочего органа манипулятора на программной траектории

а)



б)

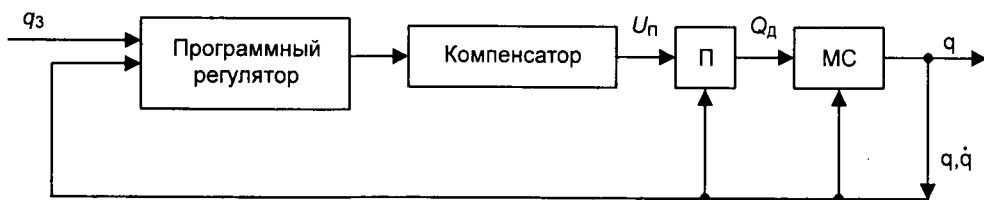


Рис. 8.11. Схема манипулятора с программным регулятором: МС — механическая система манипулятора; П — приводы

Аналитический синтез оператора A_p с получением общего решения поставленной задачи практически невозможен вследствие сложности объекта управления — манипулятора (многомерность, взаимосвязанность, нестациона-

нарность, нелинейность, гибкость). Поэтому в подобных случаях приходится прибегать к многошаговой итеративной процедуре: вначале упрощать объект до такой степени, чтобы получить возможность синтеза алгоритма управления им, а затем уже в порядке более простой и однозначной процедуры анализа рассмотреть влияние на полученное решение отдельных ранее неучтенных факторов и соответственно откорректировать это решение.

В порядке упрощения задачи на первом этапе достаточно пренебречь взаимовлиянием приводов. Тогда система распадается на автономные приводы, алгоритмы управления которыми были рассмотрены в параграфах 8.2 и 8.3. Напомним полученные там результаты решения.

- Типовой алгоритм управления по Δq_i с обратной связью по $\dot{q}_i$ дополняется при необходимости обратными связями для подавления упругих колебаний, контуром подстройки в случае существенной нестационарности параметров манипулятора, последовательной коррекцией и релейной приставкой, подключаемой при больших Δq_i .
- Алгоритмы робастного управления с обратной связью по ускорению или релейной.

Если затем в системе таких автономных приводов учесть их взаимовлияния, это потребует введения соответствующих перекрестных связей между приводами, корректирующих эти влияния путем компенсации прежде всего вредных для качества управления манипулятором взаимовлияний.

При применении робастных алгоритмов управления приводами их взаимовлияние устраняется, поэтому дополнительных мер на общесистемном уровне здесь не требуется. Однако, как ранее было отмечено, такое развязывание приводов достигается за счет предельного их форсирования. Поэтому в целом выбор алгоритмов управления отдельными приводами должен определяться конкретными техническими требованиями к системе управления манипулятора. В частности, чем слабее требования по быстродействию, тем более динамически слабое и соответственно более простое в реализации управление целесообразно выбирать, вплоть до кинематического управления и программирования без динамической коррекции (см. параграф 8.1).

Если описанные здесь способы совместного управления приводами манипулятора с помощью общесистемного программного регулятора дополнить возможностями последовательной общесистемной коррекции с помощью компенсатора, получится полный арсенал алгоритмов и структур двухуровневого непрерывного управления манипулятором, как показано на рис. 8.11, б.

Рассмотрим такое совместное применение программного регулятора и компенсатора. Соответствующая схема, полученная добавлением к схеме компенсатора на рис. 8.8 программного ПД-регулятора, приведена на рис. 8.12.

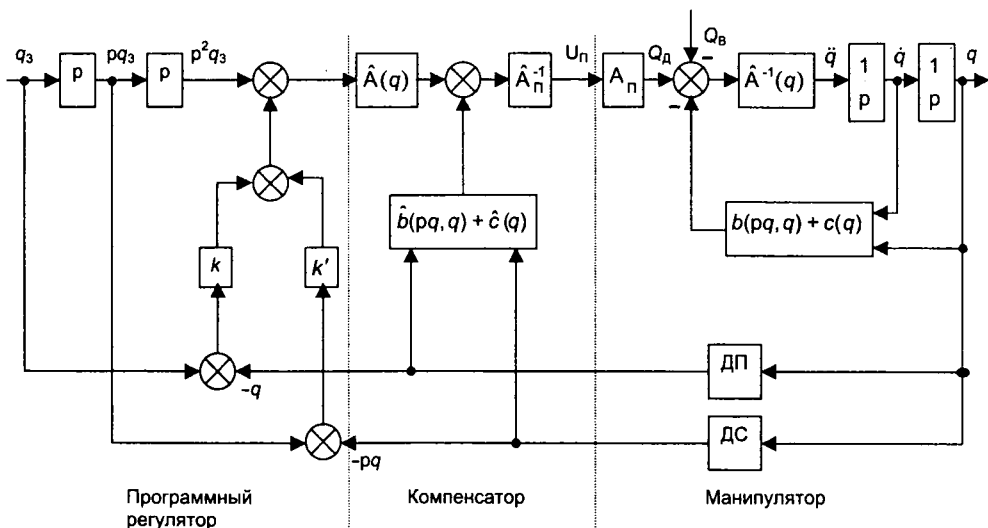


Рис. 8.12. Схема манипулятора с программным регулятором и компенсатором

Ее описание имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} A(q)p^2q + b(pq, q) + c(q) &= Q_d - Q_B; \\ Q_d &= A_n A_k A_p = A(q) \left[p^2 q_3 + (k'p + k)\Delta q \right] + b(pq, q) + c(q). \end{aligned} \right\} \quad (8.8)$$

Здесь A_n , A_k и A_p — операторы соответственно системы приводов, компенсатора и ПД-регулятора. Исключив Q_d , получаем уравнение системы при идеальном компенсаторе для приращений q :

$$(p^2 + k'p + k)\Delta q = -A^{-1}(q)Q_B. \quad (8.9)$$

Здесь k' и k — диагональные матрицы коэффициентов настройки ПД-регулятора. Таким образом, система управления распадается на n автономных систем приводов. Выбором значений коэффициентов k' , k может быть обеспечена как устойчивость, так и желаемое качество переходных процессов, и точность удержания рабочего органа на программной траектории. В частности, при выбранном алгоритме регулятора будет иметь место статическая ошибка

$$\Delta q_{ист} = \frac{\Delta Q_{Bi}}{k_i}.$$

Для ее устранения можно перейти к ПИД-регулятору, введя интегрирующее звено. В качестве примера реализации схемы рис. 8.12 вернемся к схеме управления трехзвенным манипулятором с компенсатором (рис. 8.9). Для того чтобы ввести в нее программный регулятор, надо добавить на вход каждого из трех каналов после звена p^2 сигнал $(k'_ip + k_i)\Delta q_i$, где $\Delta q_i = q_i - q_{i3}$, q_i — это φ , z и r . В результате получаются три канала управления приводов φ , z и r , связанные друг с другом перекрестными связями, компенсирующими их взаимовлияние и нестабильность механической системы манипулятора.

Если компенсация в схеме на рис. 8.12 неполная, уравнение системы управления уже не будет таким простым, как (8.9). В частности, могут появиться взаимовлияния и нестабильность. Это выразится в том, что при синтезе алгоритма программного регулятора матрицы коэффициентов его настройки станут недиагональными и переменными, т. е. может потребоваться подстройка. Таким образом, упрощение компенсатора ведет к усложнению программного регулятора. Оптимальная структура всей системы управления, как отмечалось ранее, соответствует минимальной ее сложности при обеспечении требуемого качества управления манипулятором в целом.

8.5. Системы управления манипулятором совместно по положению и силе

Роботы своими манипуляторами производят определенную работу, т. е. наряду с перемещением развивают силовое воздействие на объекты внешней среды. Соответствующее управление называется позиционно-силовым.

Такое позиционно-силовое управление имеет следующие варианты.

- ☐ Оно может осуществляться на уровне абсолютных координат рабочего органа манипулятора, т. е. по x_p и Q_p , или по относительным координатам на приводном уровне, т. е. по q и Q_d .
- ☐ Может осуществляться по одной координате или по разным — по одним позиционное управление, а по другим силовое.
- ☐ Может быть независимым или связанным, когда перемещения и усилия являются функционально зависимыми. Очевидно, что независимое позиционно-силовое управление возможно только по разным координатам, а связанное может быть как по разным координатам, так и по одной и той же координате.

Возможные комбинации перечисленных вариантов автоматического позиционно-силового управления представим следующей классификацией.

1) Позиционно-силовое управление по абсолютным степеням подвижности рабочего органа, т. е. по x_p и Q_p .

1.1) Независимое управление составляющими векторов x_p и Q_p по разным степеням подвижности. Простейший пример такого управления — силовая обработка плоскости рабочим инструментом манипулятора с прямоугольной системой координат, когда обрабатываемая поверхность лежит в плоскости двух координат этой системы. Силовое воздействие осуществляется по координате перпендикулярной обрабатываемой плоскости, а по остальным координатам осуществляется сканирование этой поверхности путем позиционного управления.

1.2) Связанное управление по положению и силе по разным степеням подвижности в виде следующих двух вариантов.

- Позиционное управление по отдельной координате или по нескольким, образующим вектор, при наличии их функциональной зависимости от силы или вектора силы по другим степеням подвижности. Примером может служить описанная ранее силовая обработка поверхности, но с изменением скорости сканирования в зависимости от величины силового воздействия на эту поверхность.
- Такое же связанное управление, но с обратной зависимостью силы от положения по разным степеням подвижности. Если при той же силовой операции силовое воздействие не задается постоянным, а должно изменяться по определенному закону по ходу перемещения по поверхности, то это будет примером связанного позиционно-силового управления, когда сила задается как функция координат рабочего органа. Так же связанное позиционно-силовое управление будет и в случае такой силовой обработки не плоскости, а поверхности произвольной формы, даже если сила должна поддерживаться постоянной.

1.3) Связанное позиционно-силовое управление по одним и тем же степеням подвижности рабочего органа манипулятора в двух вариантах.

- Управление перемещением с наложением функциональной зависимости от развиваемого усилия.
- Управление усилием с наложением зависимости от перемещения.

В первом варианте в системе позиционного управления вводится обратная связь по силе (моменту), которая создает эффект эквивалентный изменению податливости механической конструкции по этой степени подвижности. Положительная обратная связь уменьшает эту податливость, компенсируя упругие деформации в этом механизме, а отрицательная, наоборот, увеличивает податливость. Податливость часто специально вводится для

облегчения выполнения отдельных технологических операций, например, механической сборки, абразивной обработки и т. п. Создание такой податливости за счет управления приводами имеет определенные преимущества перед конструктивной ее реализацией (подпружиниванием механизма передачи). Во-первых, такое решение не требует усложнения конструкции механизма, а, во-вторых, появляется возможность программно изменять величину податливости в соответствии с особенностями очередной подлежащей выполнению операции. Такое позиционно-силовое управление получило название управление импедансом (сопротивлением).

Обратная связь по силе в рабочем органе манипулятора Q_p реализуется путем нахождения решением обратной задачи динамики составляющих этого усилия, обязанных приводам отдельных степеней подвижности и осуществления обратных связей по ним в этих приводах.

Во втором указанном ранее варианте связанного управления задаваемое усилие воздействия на объект внешней среды корректируется в функции от происходящего при этом перемещения.

Рассмотренное позиционно-силовое управление может быть статическим (статизм перемещения по силе и наоборот) или динамическим, реализуемым алгоритмами типа ПИД и т. п. Последнее позволяет учесть свойства объектов внешней среды, с которыми взаимодействует манипулятор, их динамические свойства, жесткость и т. д. и тем повысить качество управления этим взаимодействием.

2) Позиционно-силовое управление по относительным степеням подвижности, т. е. по q и Q_d .

В этом случае возможны все перечисленные ранее варианты позиционно-силового управления. Например, в позиционных электрических приводах постоянного тока широкое применение нашла обратная связь по току в якоре двигателя для изменения жесткости механической характеристики — статической зависимости частоты вращения от движущего момента на валу.

3) Комбинированное позиционно-силовое управление по абсолютным и относительным степеням подвижности.

Наряду с перечисленными ранее вариантами позиционно-силового управления манипулятором возможны варианты такого управления, когда одновременно используются и абсолютные и относительные переменные.

Например, при программном позиционно-силовом управлении по абсолютным координатам для того, чтобы освободиться от необходимости измерять абсолютные координаты рабочего органа x_p , обычно на основе решения обратной задачи манипулятора переходят от x_p к относительным координатам

$q_3 = f^{-1}(x_{p3})$. В результате получается комбинированная система позиционно-силового управления по q и Q_p .

Рассмотрим примеры систем позиционно-силового управления, реализующих перечисленные варианты такого управления манипулятором. Ранее уже были приведены некоторые примеры технологических операций, требующих такого управления. К ним также относятся различные механические сборочно-монтажные операции, резанье, работа с наждачным кругом, открывание замка ключом или двери поворотом ручки, взятие и удержание хрупких предметов.

На рис. 8.13 показана система непрерывного управления по программе $x_{p3}(t)$ с динамической коррекцией в виде обратной связи по усилению в рабочем органе. Здесь использована эталонная модель, к которой под действием обратной связи подстраивается манипулятор.

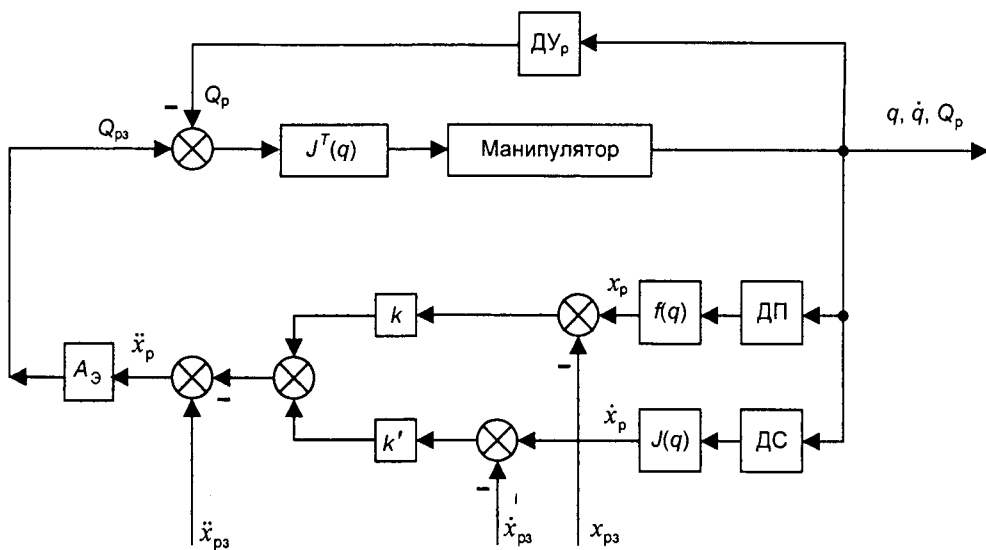


Рис. 8.13. Схема системы программного непрерывного управления по абсолютным координатам рабочего органа манипулятора с обратной связью по усилению:

$ДУ_p$ — датчик усилия в рабочем органе

На рис. 8.14 приведена схема системы управления силой в рабочем органе. Фактическая сила здесь не измеряется, а обратная связь по ней формируется с помощью эталонной модели второго порядка, описываемой уравнением:

$$A_3 \ddot{x}_p = Q_{p3} - Q_p. \quad (8.10)$$

Здесь A_3 — диагональная матрица инерции, Q_{p3} — вектор усилий приводов эталонной модели, Q_p — вектор внешних сил. Измерение и учет этих внешних сил, действующих на рабочий орган, позволяет отстраиваться от них при управлении усилием, развиваемым рабочим органом.

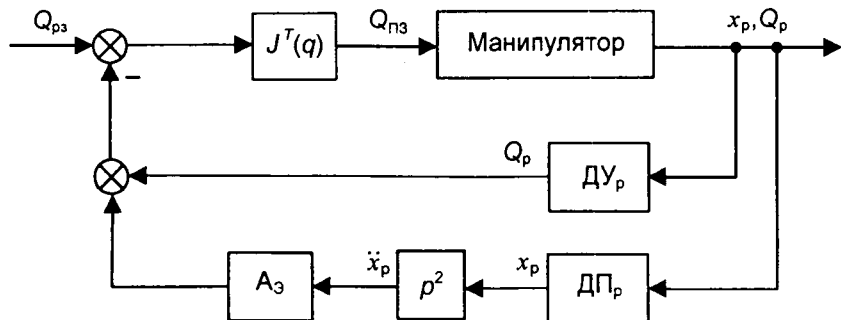


Рис. 8.14. Схема системы программного управления силой в рабочем органе: ДП_р — датчик положения рабочего органа, ДУ_р — датчик усилия в рабочем органе

Управление осуществляется по рассогласованию

$$\Delta Q_p = Q_{p3} - Q_{p3}$$

или с учетом (8.10)

$$\Delta Q_p = (A_3 \ddot{x}_p + Q_p) - Q_{p3}. \quad (8.11)$$

Здесь первый член — усилие в рабочем органе манипулятора, соответствующее эталонной модели.

Таким образом, здесь использована динамическая коррекция в виде обратной связи по усилению. Как и близкая ей обратная связь по ускорению, такая коррекция развязывает приводы, делая их автономными, и парирует все внутренние неустойчивости и параметрические возмущения. Схема на рис. 8.14 с такой коррекцией может применяться для управления не только по вектору силы Q_p , но и по вектору положения рабочего органа x_p .

Показанный на схеме способ получения $\ddot{x}_p$ путем двойного дифференцирования сигнала датчика положения x_p может быть заменен на датчик вектора скорости $\dot{x}_p$ с однократным дифференцированием или прямым измерением вектора ускорения (например, с помощью акселерометра).

На рис. 8.15 приведена схема системы одновременного независимого управления рабочим органом манипулятора по перемещению и по силе по разным степеням подвижности.

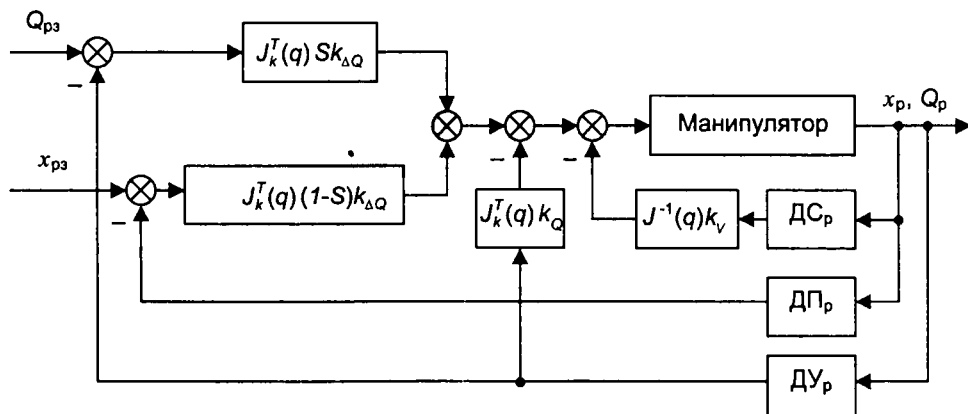


Рис. 8.15. Схема системы независимого управления перемещением и усилием в рабочем органе манипулятора:

ДП_р, ДС_р — датчики положения и скорости рабочего органа;

ДУ_р — датчик усилия в рабочем органе

Соответственно в схеме имеется два контура управления с обратной связью по положению и по силе. Кроме того, имеются две внутренние обратные связи по скорости и по силе. Здесь S — диагональная матрица селективности с элементами 1, соответствующими управлению по силе, и 0 — по положению. Эта матрица таким образом определяет координаты рабочего органа, по которым осуществляется управление по одному из этих двух способов. $K_{\Delta Q}$ и $K_{\Delta x}$ — диагональные матрицы коэффициентов настройки каналов управления по Q_p и x_p , а K_Q и K_v — аналогичные матрицы коэффициентов при Q_p и $\dot{x}_p$. Контур обратной связи по рассогласованию по силе замыкается только после появления контакта с внешней средой с помощью специального датчика (на схеме не показан).

На рис. 8.16 приведена схема системы связанного управления по положению и силе, в которой задание x_{pz} корректируется по текущему значению Q_p . При движении рабочего органа манипулятора до соприкосновения с объектом внешней среды, с которым он должен взаимодействовать, сигнал с датчика силы не поступает в схему, как и в предыдущей системе. После появления контакта, который фиксируется специальным датчиком, эта цепь включается. В результате при дальнейшем движении рабочего органа величина его хода корректируется по силе воздействия на внешнюю среду. В системе имеется еще канал программного управления скоростью $\dot{x}_{pz}$ тоже с коррекцией по силе.

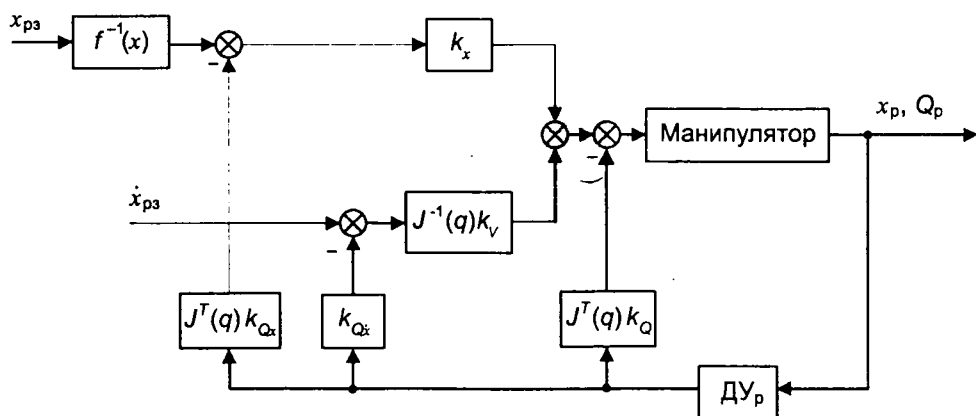


Рис. 8.16. Система связанного управления перемещением и усилием в рабочем органе манипулятора

Силовое очувствление манипуляторов осуществляется с помощью датчиков силы и момента. Кроме того, информацию о силах взаимодействия рабочего органа манипулятора с объектами внешней среды можно получить с помощью наблюдателей-вычислителей силы по математической модели манипулятора с использованием в ней значений измеряемых перемещений и скоростей его степеней подвижности. На рис. 8.17, *а* приведена схема присоединения такого наблюдателя к манипулятору, а на рис. 8.17, *б* — схема наблюдателя, соответствующая уравнению манипулятора (5.19). Согласно этому уравнению оценка искомой силы

$$\hat{Q}_{\text{внеш}} = (J^T(q))^{-1} [Q_H - A(q)\ddot{q} - b(\dot{q}, q) - c(q)].$$

Существенно более простая схема наблюдателя получается, если исключить из математической модели приводы, введя значения усилий на их выходе путем их измерения с помощью соответствующих датчиков.

Наблюдатели силы много проще и дешевле датчиков силы, имеют больший диапазон оценки силы и к тому же не требуют внедрения в конструкцию манипуляторов. Однако они примерно вдвое уступают датчикам по точности и быстродействию. Поэтому перспективным является совместное применение обоих способов силового очувствления [13].

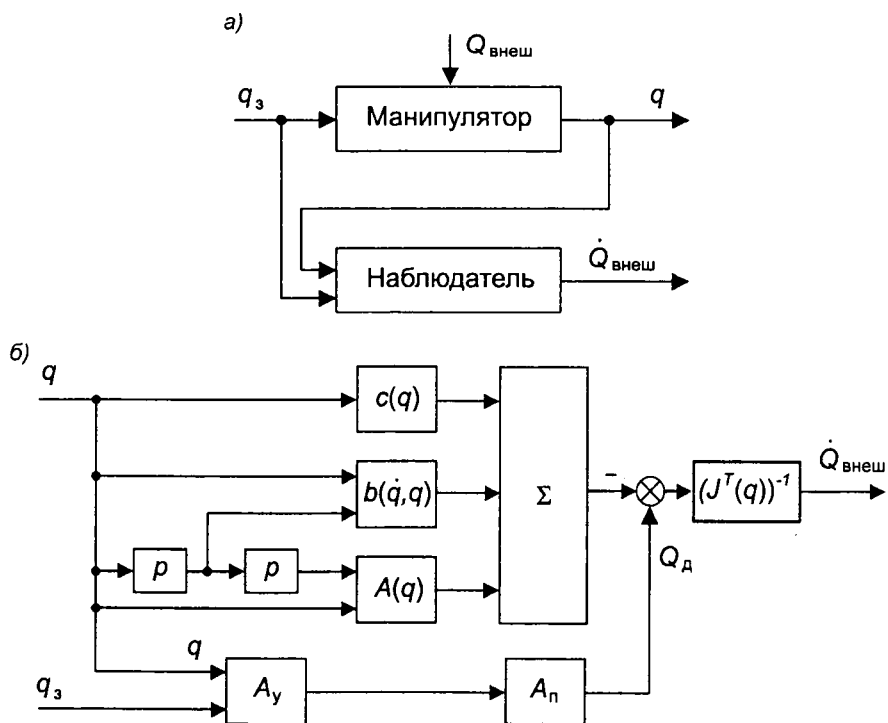


Рис. 8.17. Наблюдатель силы на основе математической модели манипулятора с системой приводов: а — схема соединения наблюдателя с манипулятором; б — структурная схема наблюдателя

ГЛАВА 9

АДАПТИВНОЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

9.1. Функциональная схема системы сенсорного (очувствленного) управления роботом

На рис. 9.1 показана общая функциональная схема системы управления движением исполнительных систем робота с использованием сенсорной информации о внешней среде. Ранее в *параграфе 3.5* были рассмотрены сенсорные системы, применяемые в робототехнике. Основные сенсорные системы — это системы технического зрения и близкие им локационные системы (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые), системы силомоментные и тактильные. Эти системы обеспечивают для управления движением робота общую обратную связь по x_p , Q_p и различным параметрам внешней среды, информация о которых необходима при выполнении роботом конкретных технологических операций.

Схема на рис. 9.1 включает 5 уровней управления:

- ☐ первый, нижний уровень — это управление отдельными степенями подвижности, т. е. приводами;
- ☐ второй — совместное программное управление приводами степеней подвижности, которое было ранее рассмотрено;
- ☐ третий — тоже совместное, но адаптивное управление приводами;
- ☐ четвертый — синтез плана выполнения действий;
- ☐ пятый, верхний — уровень обработки сенсорной информации и синтеза с ее помощью моделей внешней среды, самого робота, а также программ выполнения им типовых операций.

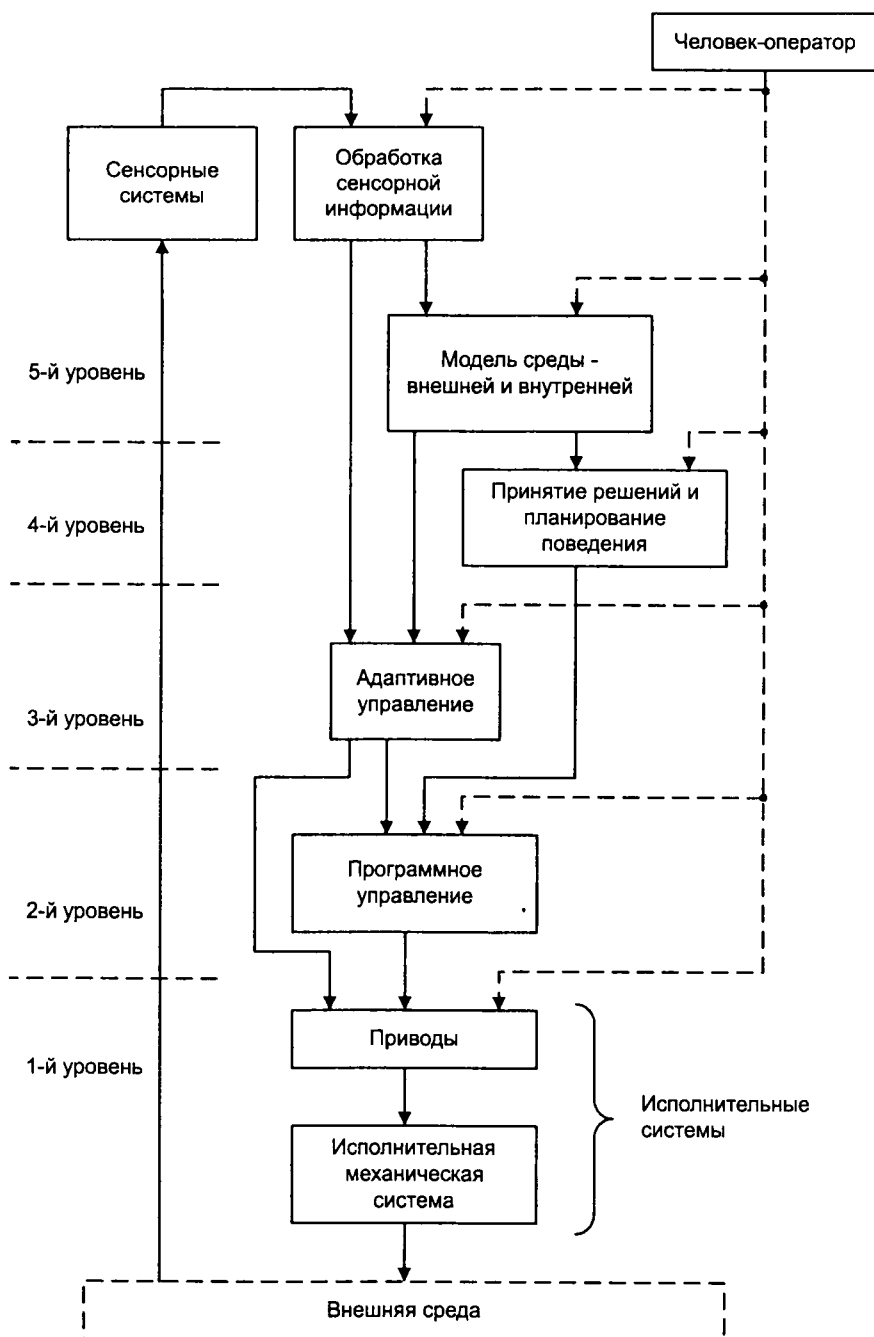


Рис. 9.1. Функциональная схема системы управления оцувствленного робота

Каждый из перечисленных уровней в свою очередь может содержать внутренние подуровни.

Функции человека-оператора в этой системе управления заключаются в следующем: выдача заданий на выполнение определенных операций, оказание в диалоговом режиме помощи в выполнении отдельными уровнями своих функций и контроль за ними, а также оперативное взятие на себя при необходимости функций любого уровня вплоть до управления отдельными приводами. Это может потребоваться, когда робот не может выполнить какую-то сложную операцию либо в аварийных ситуациях. Выдача человеком-оператором заданий может осуществляться в различной форме в зависимости от того, какие уровни должны быть при этом задействованы.

Когда подлежащая выполнению операция может быть реализована на основе рассмотренного в предыдущих главах программного управления, оператор выдает соответствующую управляющую программу на уровень программного управления. Если в ходе выполнения задания необходимо использовать сенсорную информацию, соответствующие указания поступают на вышерасположенные уровни управления.

Из приведенных на схеме рис. 9.1 пяти уровней в реальном времени участвуют в управлении движением три нижних, а также уровень обработки сенсорной информации. Информация о модели среды может изменяться в ходе выполнения операции при существенном изменении соответствующей сенсорной информации.

Приведенная на рис. 9.1 функциональная схема оцувствленного робота очень близка аналогичной схеме управления движениями человека на рис. 2.8. Это совершенно естественно, поскольку человек является прототипом и образцом при создании роботов.

9.2. Системы адаптивного управления

Рассмотренные ранее системы программного управления реализуют простейший способ управления, когда априорно достаточно точно известно все о внешней среде и самом роботе, что позволяет заранее спланировать и запрограммировать работу робота. Иными словами, такое управление предполагает полностью детерминированные внешние и внутренние условия. Однако, разумеется, такая ситуация имеет место далеко не всегда.

Несколько соответствующих типовых примеров:

- ☐ операция взятия произвольно расположенного или перемещающегося объекта (для ее выполнения необходимо автоматическое наведение схвата манипулятора на объект);

- ☐ навинчивание гайки на болт (для этого требуется предварительно "наживить" гайку на резьбу);
- ☐ дуговая сварка швов, положение которых может варьироваться (требуется вести сварочную головку строго по шву и с определенной угловой ориентацией);
- ☐ вставление стержня в отверстие с точностью, которая превышает точность позиционирования при программном управлении, и поэтому требует пробных поисковых движений;
- ☐ движение в заранее неизвестном пространстве с обходом непредвиденных препятствий и т. п.

Для выполнения подобных операций необходимо оперативно получать информацию о среде непосредственно в ходе их выполнения для использования ее в реальном времени при управлении движением. Такое управление в функции от текущей информации о внешней среде называется *адаптивным*. Необходимым условием его реализации является наличие сенсорных систем, дающих эту информацию, т. е. "очувствление" робота. Адаптация расширяет функциональные возможности робота, поскольку позволяет выполнять задачи, не решаемые программно, и упрощает его эксплуатацию, не требуя точного знания модели внешней среды и самого робота.

Адаптивное управление применяется в следующих вариантах.

- ☐ Определение значений заранее неизвестных параметров для ввода их в управляющую программу системы. Здесь адаптивное управление является надстройкой над системой программного управления, осуществляя ее самонастройку. Это *параметрическая адаптация* системы программного управления.
- ☐ Выбор управляющей программы из готового набора программ или сборка ее из набора типовых подпрограмм, в том числе и в ходе выполнения операции на основе оценки текущей ситуации по сенсорной информации. Здесь адаптивное управление тоже дополняет систему программного управления.
- ☐ Изменение (переключение) структуры системы управления, т. е. ее алгоритма, на основе оценки текущей обстановки. Например, изменение способа коррекции в системе программного управления или переход от одной сенсорной системы к другой в системе адаптивного управления.
- ☐ Последние два варианта — это *структурная адаптация* системы программного управления (самоорганизация системы).
- ☐ Беспрограммное управление движением в реальном времени только по сенсорной информации. Например, выполнение операции наведения рабочего органа манипулятора на произвольно расположенный объект.

Таким образом, адаптивное управление может осуществляться как через систему программного управления, так и минуя ее путем непосредственного воздействия на приводы. Эти два варианта отображены на схеме рис. 9.1 стрелками с уровня адаптивного управления. При выполнении конкретных технологических операций адаптивное управление чаще всего применяется именно в комбинации с программным, обеспечивая изменение параметров или структуры программного управления или, наконец, смену его, когда необходимо полностью переходить на управление по текущей сенсорной информации.

Кроме того, возможна комбинация перечисленных способов адаптации последовательно сменяющих друг друга во времени или их иерархия, в виде нескольких уровней адаптации ("адаптация адаптации"). Например, над уровнем параметрической адаптации, осуществляющим подстройку системы программного управления, может находиться уровень структурной адаптации, осуществляющий дискретное изменение в схеме последней по мере исчерпания возможности подстройки.

9.2.1. Адаптивное управление отдельным приводом

Принцип адаптивного управления может применяться не только в системе совместного управления приводов манипулятора или средства передвижения робота, как показано на рис. 9.1, но и в системе управления отдельного привода. Разумеется, в этом случае системы управления робота в целом и его исполнительных устройств не становятся адаптивными, оставаясь системами программного управления, т. к. адаптация при этом относится не к общесистемным, а к локальным переменным. Такая адаптация называется *внутренней* в отличие от *внешней*, осуществляемой с помощью общесистемной сенсорной обратной связи, как показано на рис. 9.1.

Ранее уже были описаны некоторые схемы программного управления отдельными приводами с адаптивной подстройкой в *параграфе 7.2* (рис. 7.5, 7.6) и *пункте 8.2.2*.

Было показано, что такая подстройка принципиально отличается от программной подстройки тем, что помимо программного изменения параметров управляемого объекта она парирует и все другие параметрические возмущения и погрешности математической модели объекта. На рис. 9.2 показан другой вариант адаптивной подстройки привода на базе *ассоциативной памяти* [14]. Устройство адаптивной подстройки (обведено пунктиром) стабилизирует определенный показатель качества управления (колебательность, быстродействие и т. п.), выбирая из содержащегося в ассоциативной памяти АП на-

бора настроек устройства управления привода $УУ_n$ настройку, соответствующую текущему состоянию объекта управления, которое определяется в блоке идентификации БИ по информации, поступающей с объекта. Блок оценки качества БОК управляет ассоциативной памятью, открывая ее для очередной записи новой информации при определенном изменении показателя качества.

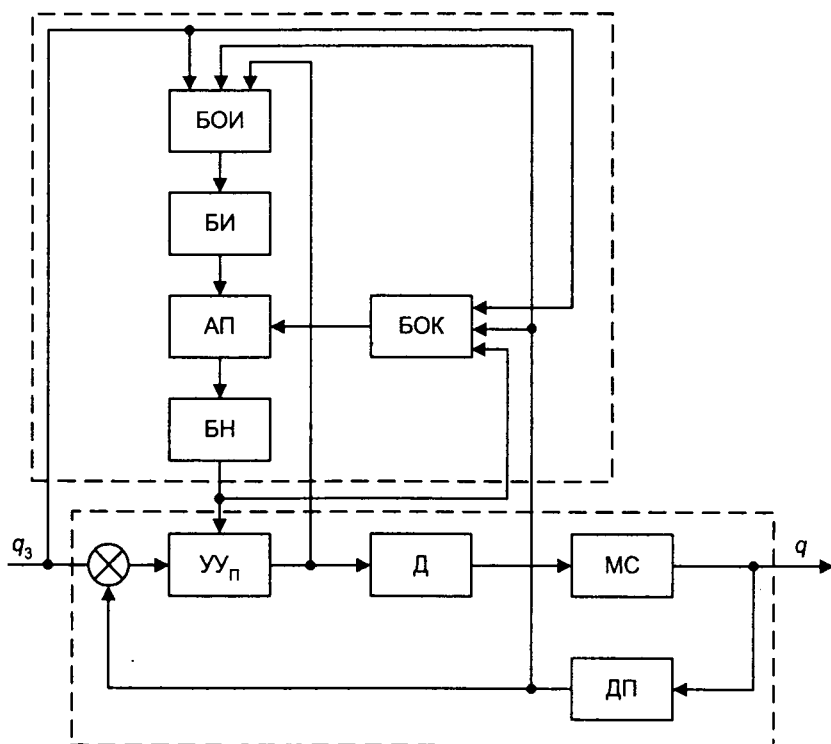


Рис. 9.2. Система адаптивного управления привода с ассоциативной памятью:

БИ — блок идентификации; АП — ассоциативная память;
 БОИ — блок обработки информации; БН — блок настройки;
 БОК — блок оценки качества

Схема должна проходить этап обучения, во время которого происходит заполнение ассоциативной памяти набором ситуаций и соответствующих им оптимальных решений в виде настройки схемы.

Итак, рассмотрены два способа адаптивного управления приводами — с эталонной моделью и управлением в функции от рассогласования объекта и модели (см. параграф 7.5) и с оценкой непосредственно качества управления.

9.2.2. Адаптивное управление манипулятором

В системах совместного управления приводами манипулятора применяются те же способы адаптации, что и при управлении отдельными приводами. На рис. 9.3 показана схема системы адаптивного управления манипулятором, представляющая собой конкретизацию той части общей схемы сенсорного управления на рис. 9.1, которая реализует такое управление манипулятором.

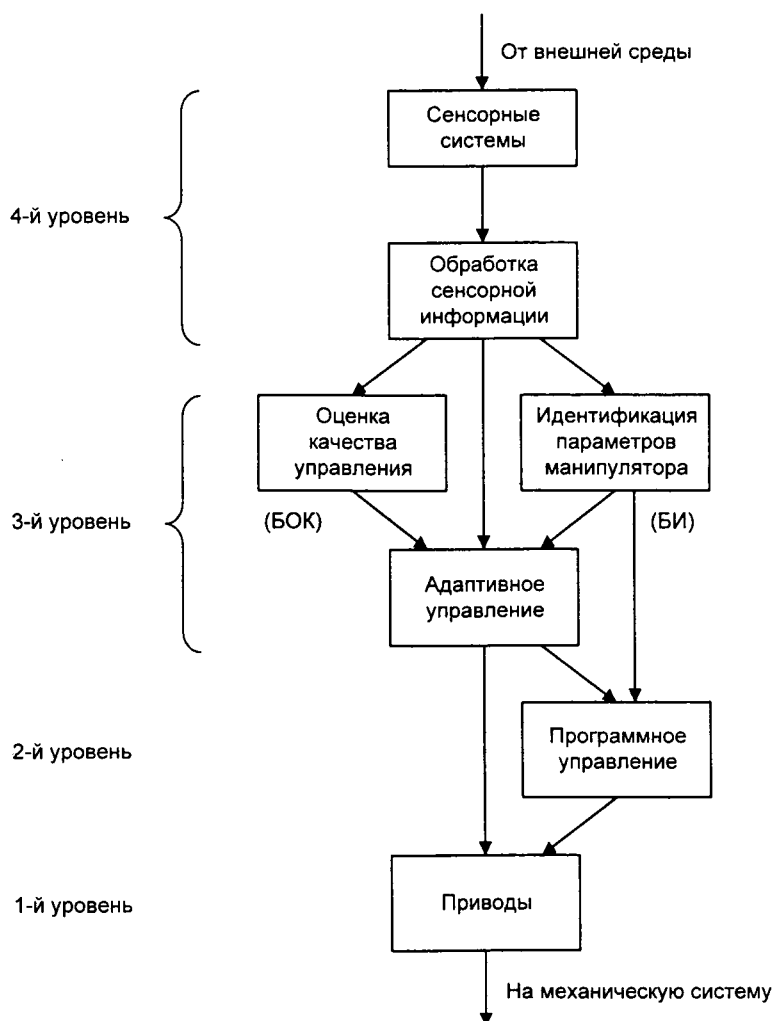


Рис. 9.3. Схема системы адаптивного управления манипулятором

Схема охватывает три уже упоминавшихся варианта адаптивного управления:

1. В функции от оцениваемого качества управления с его стабилизацией или оптимизацией.
2. По отклонению от эталонной модели.
3. В функции от текущей информации, получаемой от сенсорных систем об объектах внешней среды или координат рабочего органа манипулятора относительно этих объектов.

Остановимся на последнем варианте адаптивного управления движением, поскольку оно характерно именно для внешней адаптации. На рис. 9.4 и 9.5 приведены примеры алгоритмов такого управления для выполнения типовых операций поиска и взятия произвольно расположенных предметов и вставления стержня в отверстие.

Для выполнения таких операций схват должен быть оснащен сенсорами в виде датчиков, расположенных на его пальцах, и датчиком наличия предмета между пальцами. На рис. 9.4 приведена структурная схема алгоритма взятия манипулятором произвольно расположенного на плоскости в рабочей зоне предмета. После вывода схвата по программе в зону предполагаемого нахождения предмета производится сканирование схватом рабочей плоскости (например, строчное сканирование в квадрате с центром в точке вывода). Схват при этом ориентируется торцами пальцев перпендикулярно рабочей плоскости. При обнаружении сенсорами предмета схват останавливается над ним и ориентируется так, чтобы его пальцы находились симметрично относительно середины предмета с двух сторон от его более узкой части. После этого схват опускается и по сигналу датчика наличия предмета пальцы схвата сводятся, захватывая предмет. В случае неудачи манипулятор останавливается и сигнал об этом поступает на пульт оператора. Однако обычно до этого производится повторение операции.

На рис. 9.5 упрощенно показан один из алгоритмов выполнения типовой сборочной операции вставления стержня в отверстие. Здесь применяются сенсоры, выявляющие относительное положение сопрягаемых деталей и усилие сопряжения.

Операция выполняется по методу направленного ориентирования и заключается в перемещении стержня, зажато в схвате манипулятора, относительно отверстия до совпадения их осей настолько, чтобы стало возможным вставление стержня в отверстие. После этого осуществляется последнее движение.

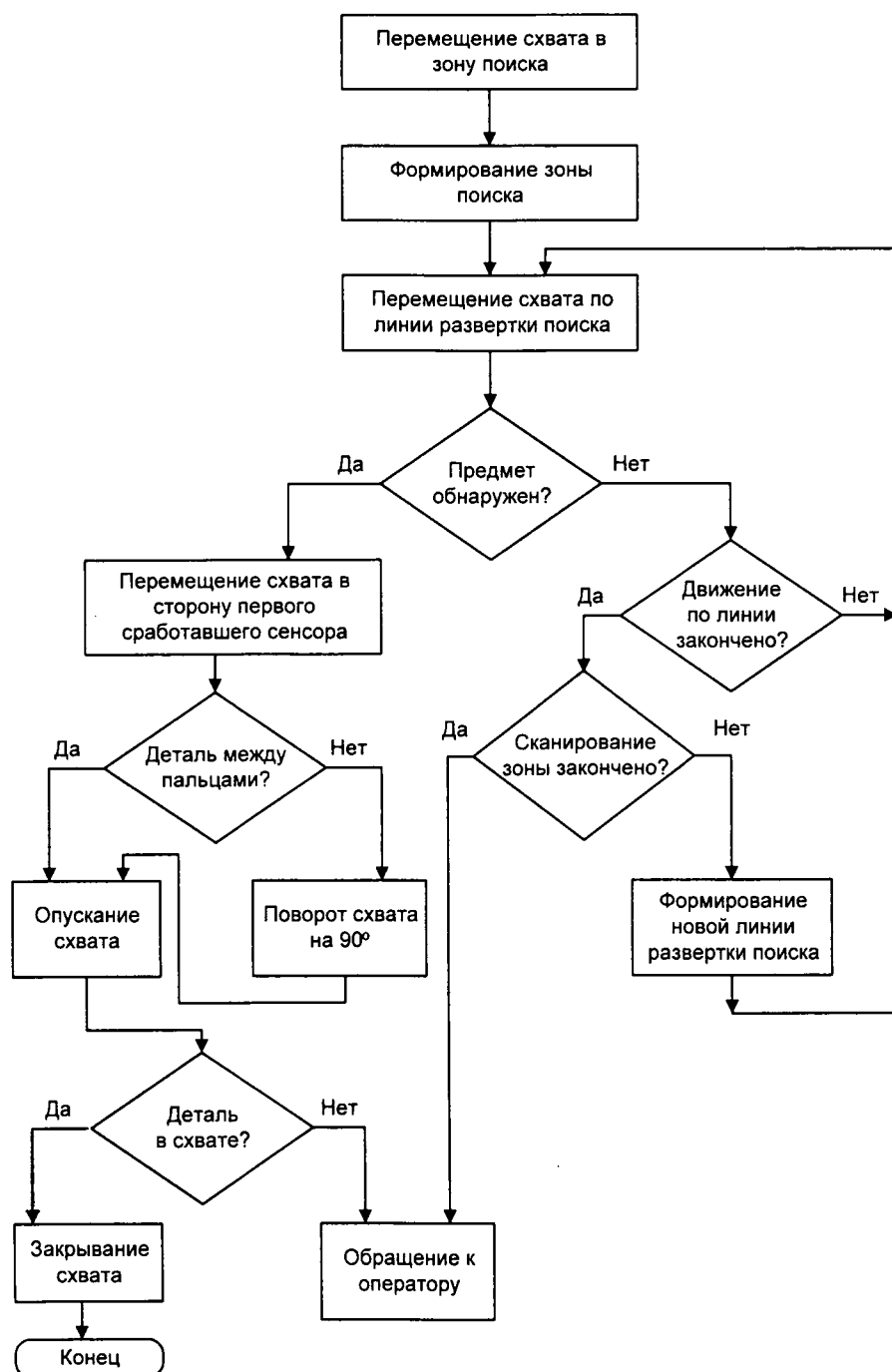


Рис. 9.4. Структурная схема алгоритма поиска и взятия предмета

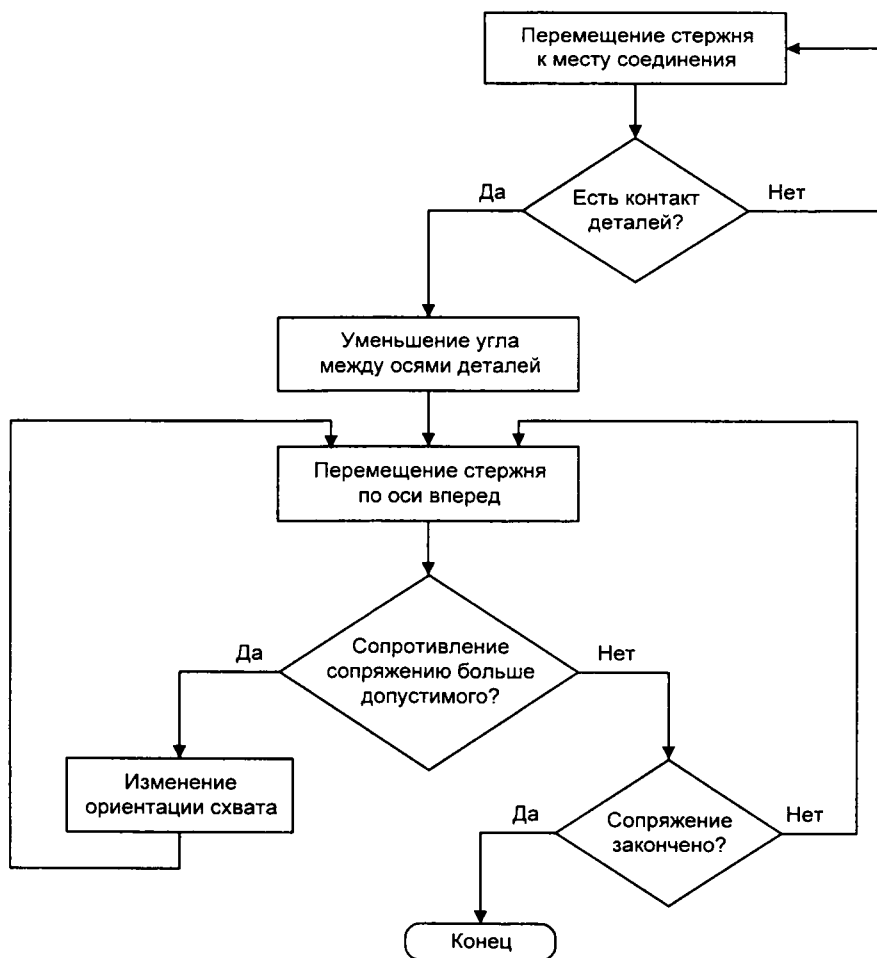


Рис. 9.5. Структурная схема алгоритма соединения типа "вал-втулка"

9.3. Системы интеллектуального управления

Интеллектуальное управление — высшая ступень управления в теории автоматического управления после программного и адаптивного. Оно основано на применении методов искусственного интеллекта (отсюда само название этого способа управления).

Термин "искусственный (технический) интеллект" метафоричен и означает, что обладающая им техническая система способна выполнять функции, кото-

рые, если бы их выполнял человек, считались бы интеллектуальными, т. е. требовали бы от человека приложения его естественного интеллекта. При этом искусственный интеллект имитирует естественный только в узко специальном (профессиональном) отношении и никаких более широких аналогий с естественным интеллектом не имеет. Последний неизмеримо многограннее и шире, охватывая помимо профессиональной все другие сферы человеческой деятельности, включая социальную, а также эмоциональность и принципиально иную мотивацию, свойственную только человеку.

Современные методы искусственного интеллекта можно объединить в две группы: математические методы, основанные на математической логике, лингвистике, теории игр и т. п., и эвристические методы, заимствованные из опыта и особенностей мышления человека — методы экспертных систем, методы, основанные на технических нейронных структурах и ассоциативной памяти.

Основная область применения интеллектуального управления — это, прежде всего, сложные объекты и большие системы, для которых доступно описание только на семиотическом уровне. Вместе с тем интеллектуальное управление часто требуется и для достаточно простых объектов, если с их помощью решаются интеллектуальные задачи или если сама задача управления ими требует интеллектуального подхода, например, в силу сложности внешних условий.

В робототехнике искусственный интеллект требуется прежде всего для решения следующих задач:

- ☐ обработка сенсорной информации;
- ☐ формирование моделей внешней среды;
- ☐ оценка текущей ситуации, принятие решений и планирование поведения;
- ☐ управление движением;
- ☐ создание интеллектуального интерфейса для человека-оператора.

Уровень искусственного интеллекта связан прежде всего с развитием иерархической структуры модели среды путем формирования все более обобщенных уровней ее представления путем перехода от образов внешней среды, непосредственно воспринимаемых сенсорами системы, ко все более обобщенным абстрактным образам и понятиям. Следствие этого — расширение функциональных возможностей робота благодаря автономному решению все более сложных интеллектуальных задач, включая самоусовершенствование в процессе активного взаимодействия с внешней средой при решении этих задач.

Одним из наиболее обобщенных типов моделей среды являются лингвистические модели. Они применяются для сложных объектов с неоднозначной

реакцией на одни и те же ситуации, которые не могут быть описаны формально логически и поэтому описываются эвристически на основе экспертных оценок на языке близком естественному.

Методы искусственного интеллекта применяют в системах управления не только в общесистемных контурах управления, но и для решения различных локальных задач отдельных систем робота. В этом случае процесс управления роботом, естественно, не становится интеллектуальным подобно тому, как в системах управления наличие внутренней адаптации в отдельных частях системы не делает систему в целом адаптивной.

На рис. 9.6 показана обобщенная схема системы интеллектуального управления робота, которая представляет собой конкретизацию общей схемы управления оцувствленного робота на рис. 9.1 в части применения искусственного интеллекта при решении перечисленных ранее задач [15].

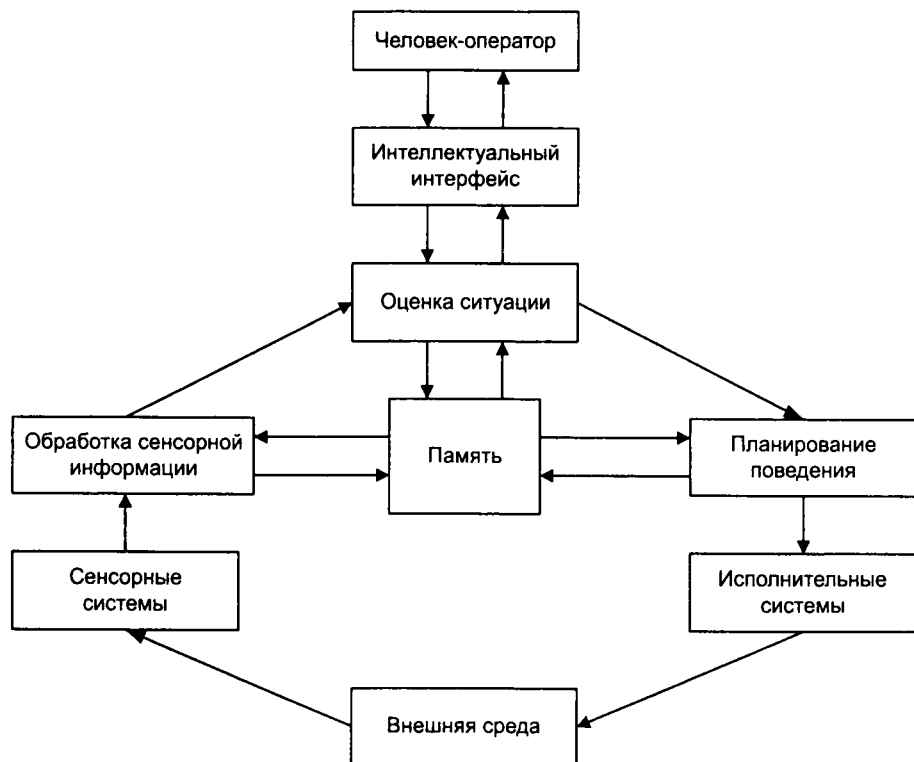


Рис. 9.6. Схема системы интеллектуального управления робота

В центре схемы находится блок памяти, двусторонне связанный с другими системами, перерабатывающими информацию. Объем и уровень организации

памяти — главный показатель интеллектуального потенциала робота. В блок памяти входит *база знаний* о внешней среде — основа интеллекта и база данных как о внешней среде, так и о самом роботе и об операциях, которые он может выполнять. Кроме того, специализированные оперативные базы знаний и данных, связанные с этой центральной памятью, могут иметься и в отдельных системах робота.

База знаний о внешней среде содержит как априорную информацию, вводимую до начала работы, так и оперативную сенсорную, которая приобретается в процессе восприятия окружающей среды при выполнении роботом заданных действий, а также в процессе его специальных познавательных действий, направленных на изучение этой среды. Эта информация включает в себя описание геометрических и других физических характеристик объектов среды и их взаимосвязь. Такое описание, как отмечалось, имеет иерархическую структуру. Например, описание рабочей зоны манипулятора включает планы всей зоны и ее частей, различающихся как масштабом и соответственно точностью, так и степенью обобщения первичной сенсорной информации (выделение линий, контуров, поверхностей, объектов).

Введение в эти планы времени как параметра дает картину внешней среды в динамике с учетом взаимодействия ее объектов друг с другом и с роботом. База знаний о внешней среде содержит также правила, позволяющие моделировать возможные изменения этой среды. Сами знания представляются в виде логических и сетевых моделей среды. Логические модели основаны на аппарате математической логики и, прежде всего, на исчислении предикатов. Модели строятся из системы базовых элементов и системы правил и аксиом. В сетевых моделях вершины сети соответствуют объектам среды, а дуги — отношениям между ними. Применяются *сети фреймов*, описывающих объекты среды, и *семантические сети*.

Все другие блоки схемы также имеют иерархическую структуру, уровни которой соединены друг с другом по вертикали. В свою очередь показанные на схеме соединения блоков осуществляются многоканально между одноименными уровнями по горизонтали.

Блок обработки сенсорной информации получает из блока памяти экстраполяцию изменения состояния внешней среды, а передает в него очередную коррекцию этого состояния на уровнях сенсорной картины среды.

Так, в блоке обработки сенсорной информации имеются параллельные каналы по обработке различного типа сенсорной информации, в которых снизу вверх передается информация по уровням со все большим обобщением. Например, в канале технического зрения это обобщение начиная с исходной картины внешней среды завершается переходом от образной информации к вербальным понятиям. Аналогичные уровни других блоков соединены по

горизонтالي, образуя иерархию контуров управления движением от типа рефлексов до реализации различной сложности технологических операций.

Блок оценки ситуации и блок планирования поведения получают из блока памяти текущую модель внешней среды, а передают в него ее оценку по определенным критериям и синтезированный план управления движением робота. Главные задачи этих блоков — принятие решений, адекватных оценке текущей ситуации, и последующий синтез плана их реализации.

При синтезе этого плана применяются различные приемы решения задач, разработанные в рамках искусственного интеллекта, в том числе:

- ☐ поиск решения в пространстве состояний (нахождение последовательности преобразования исходного состояния в конечное целевое);
- ☐ сведение задачи к подзадачам (последовательное разбиение задачи на подзадачи вплоть до элементарных, решение которых известно);
- ☐ решение в форме доказательства теорем (формулирование задачи как теоремы и ее решение (доказательство) на базе системы аксиом).

В задачу блока оценки ситуации входит также оперативная корректировка целей управления и их приоритетов. Это верхний интеллектуальный уровень в иерархии управления роботом.

Блок интеллектуального интерфейса в общем случае должен быть двусторонне связан со всеми перечисленными функциональными блоками, что для простоты не показано на рис. 9.6.

Обратим внимание на одну особенность рассмотренной обобщенной схемы системы интеллектуального управления, как и общей схемы, приведенной на рис. 9.1: в ней отсутствует в явном виде блок, ответственный за реализацию способа интеллектуального управления, как это имеет место для адаптивного и программного управления. Объясняется это тем, что искусственный интеллект распределен по всем функциональным блокам схемы в соответствии с перечисленными функциями, при реализации которых он может требоваться. В конкретных системах он может присутствовать в любом из этих блоков. Именно поэтому наряду с термином "системы интеллектуального управления" существует более общий термин "интеллектуальные системы управления". Схему на рис. 9.6 точнее следует назвать именно так.

Применение искусственного интеллекта в системах управления роботов началось с введения элементов искусственного интеллекта в системы адаптивного управления на основе указанных ранее интеллектуальных методов. Наибольшее распространение получили технологии *экспертных систем*.

На рис. 9.7 показана типовая структура экспертной системы управления привода манипулятора. Такая система может быть использована и на уровне

планирования поведения. База знаний содержит теоретические и эмпирические сведения о кинематике и динамике манипулятора.

База данных включает информацию о текущем состоянии системы управления и цели управления, а база алгоритмов — алгоритмы обработки данных, идентификации и управления. Блок правил логического вывода формирует экспертное заключение об оптимальной текущей структуре и настройке системы приводов, которое затем реализуется выбором соответствующего алгоритма управления с передачей его в систему управления.

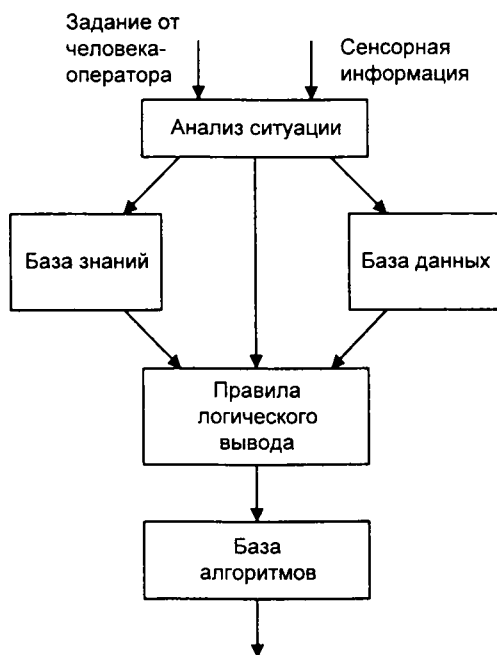


Рис. 9.7. Структура экспертной системы адаптации для системы управления

На рис. 9.8 приведен пример управления манипулятором по заданным абсолютным координатам его рабочего органа x_{p3} с экспертной системой настройки с помощью обучающейся базы данных [13].

Блок оценки качества БОК выявляет отклонения выбранного показателя качества для каждого привода по их выходным переменным. Это реализуется в виде экспертной системы.

Блок настройки БН приводов также построен на базе знаний, содержащей рекомендации экспертов. По мере накопления опыта в ходе эксплуатации

системы содержание базы знаний пополняется, т. е. происходит самоусовершенствование системы.

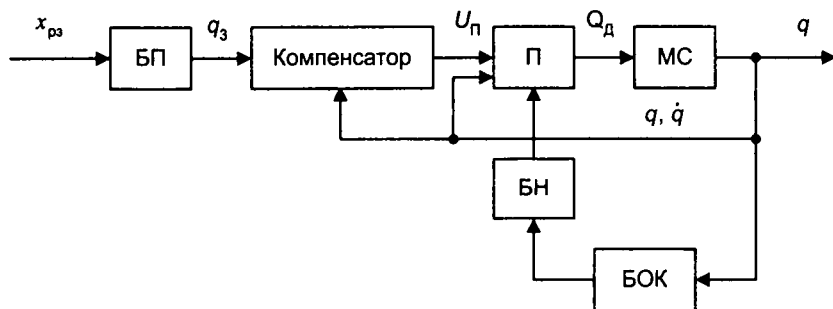


Рис. 9.8. Схема системы управления манипулятором с самообучающейся экспертной системой настройки: БП — блок программирования; БН — блок настройки; БОК — блок оценки качества; П — система приводов; МС — механическая система манипулятора

Вместо компенсатора с подстройкой, описанного в пункте 8.4.1, можно применить обучающуюся многослойную *нейронную сеть*. В этом случае отпадает необходимость в знании математической модели управляемого объекта.

На рис. 9.9, а показана система управления привода на базе таких нейронных сетей [14]. Здесь НС-УУ — нейросетевое устройство управления, а НС-модель — нейросетевая модель объекта управления (идентификатор).

НС-модель настраивается на объект по сигналу рассогласования их выходов и формирует обучающую выборку для подстройки устройства управления НС-УУ в соответствии с принятым критерием качества управления (быстродействие, энергопотребление и т. п.) при изменениях параметров объекта. Здесь применены трехслойные нейронные сети прямого распространения, осуществляющие нелинейное преобразование вектора входной переменной в вектор выходной (рис. 9.9, б). Настройка нейронных сетей осуществляется изменением весовых коэффициентов связей и параметров нейронов методом обратного распространения ошибки [15].

На рис. 9.10 показана система управления манипулятора, разработанная на основе этой схемы. Здесь нейронная сеть НС1 решает прямую задачу кинематики $x_p = f(q)$, а НС2 — обратную $q = f^{-1}(x_p)$.

Наряду с упомянутым отсутствием необходимости значения математической модели объекта управления достоинствами нейросетевых систем являются быстродействие, обусловленное параллельной обработкой компонентов векторных переменных, и простота.

Пример системы управления, использующей *ассоциативную память*, был приведен на рис. 9.2 при рассмотрении систем адаптивного управления приво-дов. Уровень интеллектуальности этой системы определяется содержанием и способом заполнения ассоциативной памяти. Если эта память заполняется по экспертным данным, уровень интеллекта системы будет, естественно, определяться уровнем этих данных.

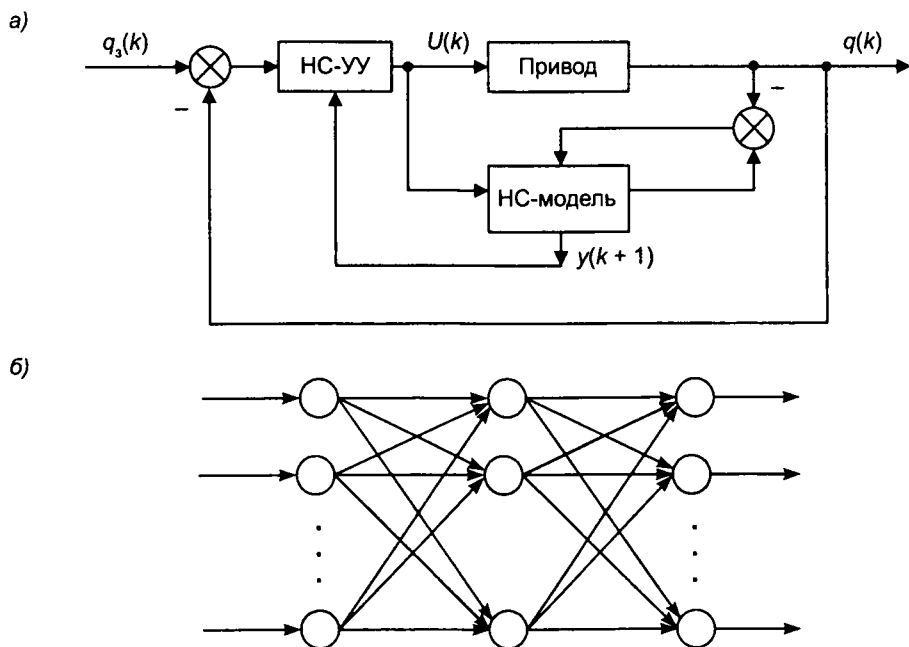


Рис. 9.9. Система управления приводом на базе нейронных сетей:
а — структура системы; б — структура НС-модели

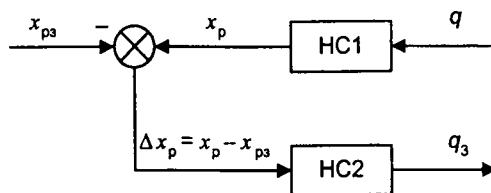


Рис. 9.10. Структура системы управления манипулятором
по абсолютным координатам его рабочего органа на базе нейронных сетей

Системы, использующие ассоциативную память, которая тоже обычно реализуется с помощью нейронных сетей, выгодно отличаются от построенных на базе экспертных систем большим быстродействием благодаря практически

мгновенному формированию ассоциаций с выбором из памяти настроек или управляющих сигналов (без процесса сопоставления альтернативных решений и выбора наилучшего, как это делается в экспертных системах). Конечно, это дается ценой снижения качества управления по сравнению с полноценной экспертной системой из-за большей грубости принимаемых решений. Системы управления на базе ассоциативной памяти по быстродействию превосходят также и традиционные системы адаптивного управления.

Как было отмечено, к методам искусственного интеллекта, применяемым в системах интеллектуального управления, относятся методы, основанные на математической логике, включая *нечеткую логику*. Последняя позволяет формализовать описание процессов и систем при неполном знании о них, т. е. формализовать неопределенности. Пусть, например, для некоторого объекта известны (выбраны) значения выходной переменной только для нескольких дискретных значений входного воздействия. Аппарат нечеткой логики позволяет по этим данным описать зависимость "вход-выход" во всем диапазоне возможных значений входного воздействия. Каждому такому известному дискретному значению придается функция принадлежности ФП, которая определяет степень уменьшения доверия к факту принадлежности выходной компоненты к этому дискретному значению по мере удаления величины входного воздействия от значения, соответствующего этому значению переменной. При этом, конечно, при формировании этой функции используется вся известная информация — статические данные, экспертные оценки и т. п.

На рис. 9.11 показан пример описания зависимости "вход-выход" с помощью четырех простых линейных функций принадлежности ФП, которые построены в относительных единицах. Каждая ФП определяет дискретное значение выходной величины как степень доверия к факту ее принадлежности

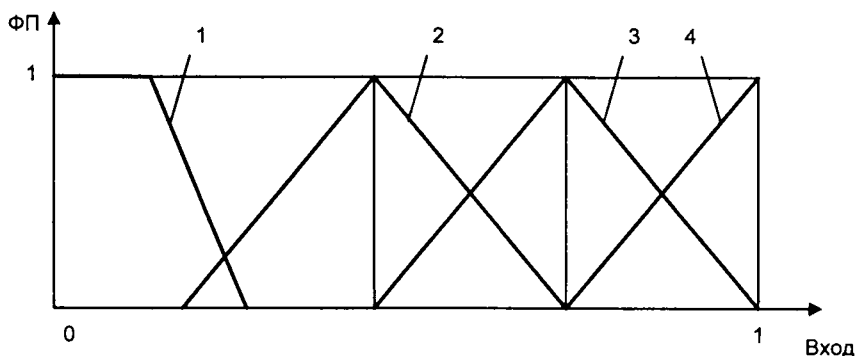


Рис. 9.11. Пример функций принадлежности (ФП)

к этому значению. Наибольшее значение каждой из этих ФП — это известное значение выходной величины, соответствующее известному значению входной величины.

На рис. 9.12 приведена функциональная схема системы нечеткого ПД управления привода, основанной на нечеткой логике [13]. Здесь Φ_1 и Φ_2 фузификаторы (*fuzzy* (англ.) — нечеткий), которые осуществляют преобразование входных переменных $e, \dot{e}$ в нечеткие переменные $E_e, E_{\dot{e}}$ с помощью функций принадлежности.

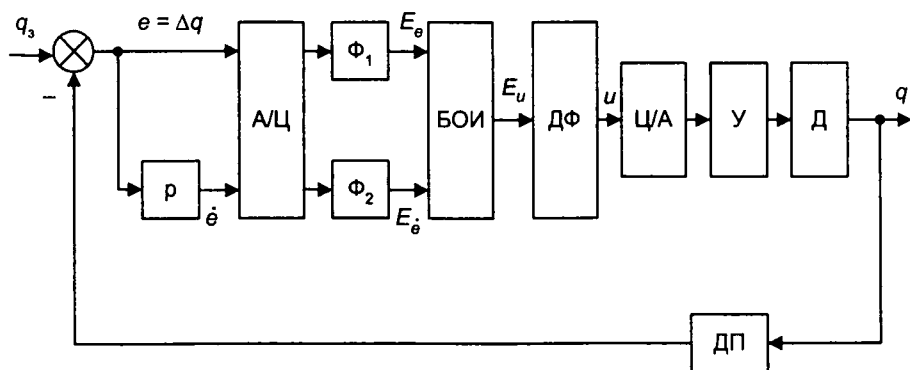


Рис. 9.12. Функциональная схема системы нечеткого управления привода: Φ_1, Φ_2 — фузификаторы; ДФ — дефузификатор; А/Ц, Ц/А — аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи; БОИ — блок обработки информации

На рис. 9.13 показаны эти функции для рассогласования по положению e . Здесь даны три функции принадлежности — П, Н и О, которые соответствуют трем выраженным в относительных единицах дискретным значениям входной переменной — положительному (+1), нулевому (0) и отрицательному (−1). Аналогичная зависимость реализуется и для $\dot{e}$ в Φ_2 .

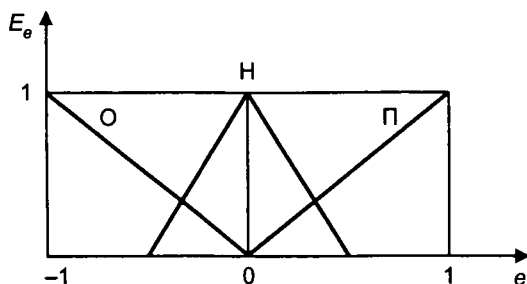


Рис. 9.13. Функции принадлежности рассогласования по положению: П — положительное рассогласование; Н — нулевое; О — отрицательное

В БОИ выполняется сложение нечетких переменных E_e и E_c с получением выходной нечеткой переменной E_u , реализующей ПД алгоритм управления. Затем в дефузификаторе ДФ осуществляет обратный переход от нечеткой переменной к абсолютным значениям выходной переменной u .

Таким образом, аппарат нечеткой логики дает возможность по нескольким известным точкам характеристики "вход-выход" некоторого звена системы управления синтезировать всю эту характеристику, устранив исходную неопределенность. В результате в структурной схеме системы это звено может быть представлено и промоделировано в последующих исследованиях такой статической характеристикой.

Основная трудность синтеза систем нечеткого управления заключается в выборе функций принадлежности. Осуществляется это в основном с помощью экспертных оценок.

Нечеткая логика, наряду с самостоятельным использованием в системах нечеткого управления, применяется в других рассмотренных интеллектуальных методах — экспертных системах, нейронных сетях, ассоциативной памяти, при наличии неопределенности, которую нельзя описать с помощью традиционного вероятностного подхода, т. е. статистически.

Дальнейшим развитием логических методов в направлении увеличения неопределенностей является интервальная логика, где все переменные задаются только интервалами их возможных значений.

Как уже упоминалось, наиболее сложным типом систем интеллектуального управления являются системы, допускающие в силу своей сложности только логико-лингвистическое описание. Это системы *ситуационного управления*. В них каждому классу возможных состояний объекта управления ставится в соответствие определенный класс допустимых управляющих решений. Основные компоненты структуры таких систем управления следующие:

- ☐ анализатор ситуации, который определяет, когда требуется воздействие на объект;
- ☐ классификатор, который на основании получаемого от анализатора описания текущей ситуации, относит ее к одному из классов ситуаций, каждому из которых соответствует определенное управляющее воздействие на объект;
- ☐ коррелятор, который по полученной от классификатора информации о классе текущей ситуации выбирает из базы управляющих воздействий соответствующее этому классу;
- ☐ экстраполятор, который включается, если предложено несколько решений, и выбирает наилучшее из них;

- блок случайного выбора, который включается в противоположном случае, когда решение не найдено, и вырабатывает не слишком сильное воздействие на объект, чтобы изменить ситуацию, сделав ее более определенной.

До начала работы такой системы ситуационного управления необходим этап ее обучения, на котором с помощью экспертов формируется база знаний в виде набора классов ситуаций и соответствующих им управляющих реакций. С помощью экспертов формируется также и процедура экстраполяции.

По существу, здесь используется та же идея, что и в экспертных системах, только для решения такой сложности задачи управления прежде всего человеком-машинными системами, для которых в настоящее время имеется только практический опыт, накопленный операторами.

В параграфе 2.6 при рассмотрении умственных способностей человека было зафиксировано, что его мышление помимо интеллекта, основанного на знаниях в виде формализованной вербальной информации, включает еще креативность, т. е. творческие способности, основанные на образной информации. В связи с этим можно заключить, что после освоения искусственного интеллекта техническим системам предстоит следующий этап развития, заключающийся в освоении аналогов творческих способностей человека, его интуиции.

Для робототехники это означает, что после интеллектуальных роботов должно появиться следующее новое поколение — разумные роботы ("роботы сапиенс"), обладающие техническим аналогом как интеллекта, так и креативности человека. В англоязычной литературе используется термин *Artificial Intellingence (A.I.)*, который охватывает техническую реализацию и интеллекта и креативности, т. е. является техническим аналогом именно разума в целом. В переводах на русский язык этот термин заменяется термином искусственный интеллект, хотя в обратном переводе он означает *Artificial Intellect*.

9.4. Особенности управления средствами передвижения роботов

Управление передвижением мобильных роботов — это транспортная задача, которая не имеет принципиальной специфики применительно к робототехнике, за исключением шагающего способа передвижения, который в силу близости их педипуляторов ("ног") к манипуляторам традиционно является предметом специального раздела робототехники. По способам и системам управления педипуляторы действительно подобны манипуляторам.

Основное отличие систем управления передвижением роботов от управления манипуляторами вне зависимости от способа передвижения заключается в неизмеримо большей рабочей зоне и в ее неопределенности.

Рассмотрим эти особенности применительно к мобильным роботам, передвигающимся по произвольной местности. В этом случае модель внешней среды представляет собой карту местности, которая помимо априорных сведений составляется и уточняется в ходе движения на основе сенсорной информации (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые локаторы, системы технического зрения). Эта модель должна иметь как минимум два уровня по масштабу: первый — в пределах достигаемости сенсорных систем, второй — непосредственно перед роботом.

Модель первого уровня местности служит для прокладки маршрута движения в соответствии с заданной целью. Это задача навигации. Варианты целей: поиск конкретных объектов (по заданным признакам); достижение определенной точки на местности, заданной координатами; движение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (инспекция, нанесения покрытия, очистка и т. д.).

Вторая, более подробная модель ближайшего участка местности необходима для уточнения маршрута непосредственно перед роботом с учетом препятствий, не отмеченных на карте местности первого уровня. В целом — это задача обеспечения безопасности движения.

Для гарантированного решения последней задачи может потребоваться специальная система обеспечения безопасности, которая контролирует углы наклона шасси робота, не допуская превышения их критических значений, определяемых условиями опрокидывания; опасные вертикальные провалы и трещины непосредственно перед роботом; оценивает свойства грунта в отношении его проходимости и, наконец, обеспечивает аварийную остановку робота по сигналу дистанционного или контактного датчика препятствий, возникающих непосредственно перед роботом.

На рис. 9.14 приведена типовая схема системы управления движением мобильного робота. Блок управления движением БУД осуществляет управление тяговыми приводами и приводами поворота шасси. Блок планирования движения осуществляет построение траектории движения, оптимизируя ее по минимуму расхода энергии, что особенно важно для роботов с автономным энергопитанием, или по минимуму времени выполнения задания, когда в постановку задачи входит условие обеспечения максимального быстродействия.

Блок построения модели местности представляет ее в форме удобной для решения задачи синтеза траектории движения с выделением непреодолимых препятствий и опасных или неясных участков.

Если выполнение задачи требует знания большего участка местности, чем дают сенсорные системы в начальном положении робота, т. е. до начала движения, карта местности формируется и передается в блок планирования

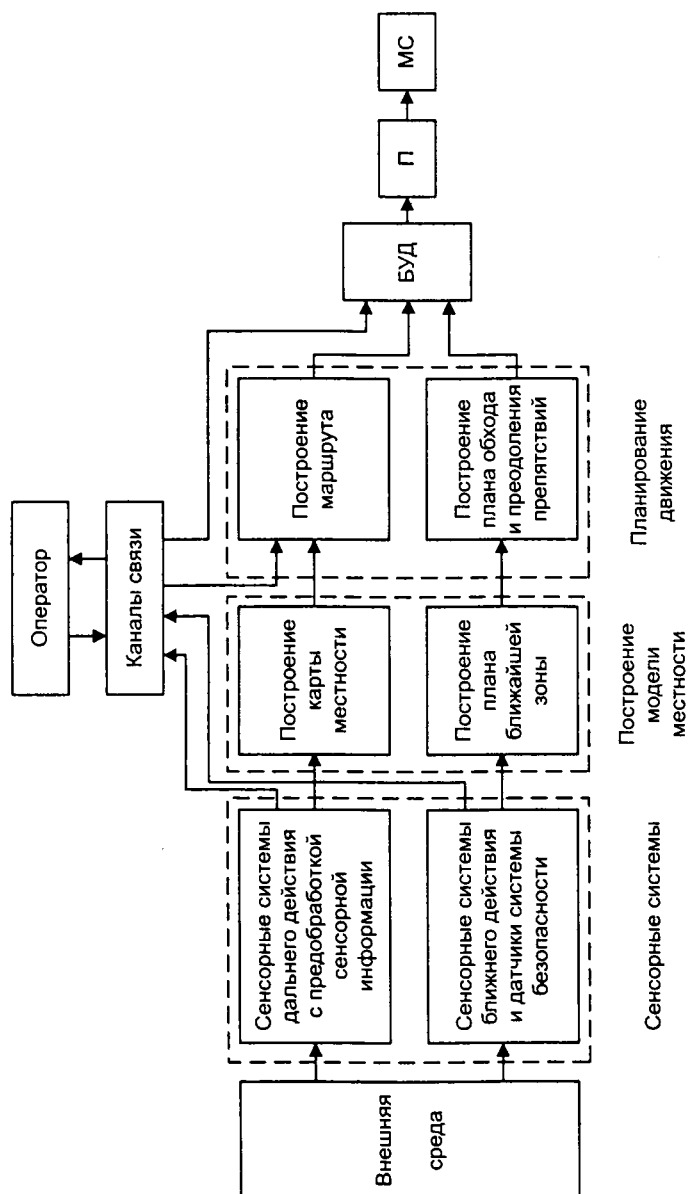


Рис. 9.14. Функциональная схема управления движением по местности мобильного робота:
 БУД — блок управления движением; П — приводы; МС — механическая система

фрагментами по мере передвижения робота. В этом случае первое приближение для всей траектории делается по имеющейся априорной информации о местности или, как минимум, определяется только общее направление движения.

На нижнем общесистемном уровне системы находится канал управления движением в ближней зоне, включающий в себя наиболее детальную модель этой зоны и реализующий алгоритмы обеспечения безопасности движения.

Требуемый уровень адаптации и искусственного интеллекта системы определяется степенью неопределенности и сложности местности, а также характером подлежащих выполнению заданий. В последнем отношении основное значение имеет минимально необходимая степень автономности управления роботом, определяемая перечнем его действий, которые должны выполняться без участия человека-оператора. При этом учитывается и возможность временной потери связи с оператором, ограниченная пропускная способность каналов связи, неполнота и ограниченная достоверность получаемой оператором от робота информации и ее задержка во времени. Например, если из-за высокого уровня помех в канале передачи оператор не получает изображения панорамы местности перед роботом или только эпизодически получает эту информацию, он имеет возможность вмешиваться в автономное движение робота только для контроля и корректировки маршрута движения путем целеуказания отдельных промежуточных точек трассы в моменты ее достоверного наблюдения. Способы управления движением робота человеком-оператором будут рассмотрены в параграфе 10.7.

ГЛАВА 10

УПРАВЛЕНИЕ СРЕДСТВАМИ РОБОТОТЕХНИКИ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ

10.1. Человеко-машинные системы

В ходе непрерывного усложнения и интенсификации техники обострилась проблема взаимодействия с ней человека, получившая название проблемы "человеческого фактора". Возникла ситуация "ножниц" между все усложняющейся техникой и остающимися, по существу, неизменными возможностями человека, участвующего в ее функционировании, его "техническими характеристиками". Подтверждением этому служит прогрессирующее нарастание аварий, в том числе глобального характера, по вине персонала, причем, прежде всего, с наиболее современными объектами.

На заре развития автоматики бытовал принцип "защита от дурака". В последнее время все чаще утверждается тезис: "человек имеет право на ошибку". Однако сегодня для все большего числа технических систем становится более актуальным принцип "защиты от злоумышленника" (террориста, Герострата и т. п.).

В целом можно так систематизировать эту проблему:

- ☐ упомянутая тенденция роста сложности и интенсификации технических систем вызывает повышение функциональных требований к участвующему в их функционировании человеку, все чаще оказывающихся на пределе его возможностей, а иногда и превышающих их;
- ☐ эта ситуация резко усугубляется в нештатных и аварийных ситуациях, причем обычно непрогнозируемых;
- ☐ человек в технических системах все более становится компонентом ненадежности;

- ☐ требования к жизнеобеспечению и безопасности человека существенно обременительны для технических систем с его участием;
- ☐ участие человека все более ограничивает перспективы создания новой техники.

Принципиально возможны следующие пути решения этих проблем:

- ☐ замена человека техникой и тем самым снятие проблемы "человеческого фактора";
- ☐ обеспечение контроля за человеком с блокированием его действий, не адекватных ситуации, в тех случаях, когда человек необходим и современная техника не позволяет его полноценно заменить или такая замена технико-экономически невыгодна.

Такое блокирование осуществляется автоматически при нарушении человеком конкретных заранее установленных формализованных ограничений его действий.

Если когда-то считалось, что решением проблемы будет полное исключение человека из участия в функционировании технических систем путем сплошной комплексной автоматизации и роботизации, то в настоящее время в связи с прогрессирующим усложнением решаемых техникой задач стало очевидным, что никакая техника в обозримом будущем не сможет полностью заменить разум человека. Поэтому общим решением рассматриваемой проблемы может быть только одно — оптимальное сочетание — симбиоз техники и человека.

Одним из основных средств такого решения являются робототехника и искусственный интеллект. В свою очередь, собственно, в робототехнике эта проблема также существует, как проблема "человек-робот". В этой главе рассматриваются состояние решения данной проблемы и тенденции дальнейшего развития этого раздела робототехники.

10.2. Классификация систем управления средствами робототехники человеком-оператором

Рассмотрим системы управления роботами и других средств робототехники с человеком-оператором в контуре управления. Такие системы относятся уже не к системам автоматического управления (САУ), которые рассматривались ранее, а к автоматизированным системам управления (АСУ) или в более широком плане — к *человеко-машинным или биотехническим системам*.

На рис. 10.1 приведена схема такой системы управления. Здесь человек-оператор выполняет функции устройства управления. Он получает или сам

формирует задание $G_{\text{ч}}$ для управляемой им технической системы, получает с помощью своих органов чувств информацию от сенсорной системы о состоянии внешней среды и самой технической системы и формирует управляющие воздействия G на эту систему так, чтобы обеспечить изменение контролируемых выходных переменных x и Q в соответствии с заданием.

Области применения такого управления, как отмечено, — это когда реализация автоматического управления на базе современной техники невозможна или невыгодна по сравнению с управлением от человека.

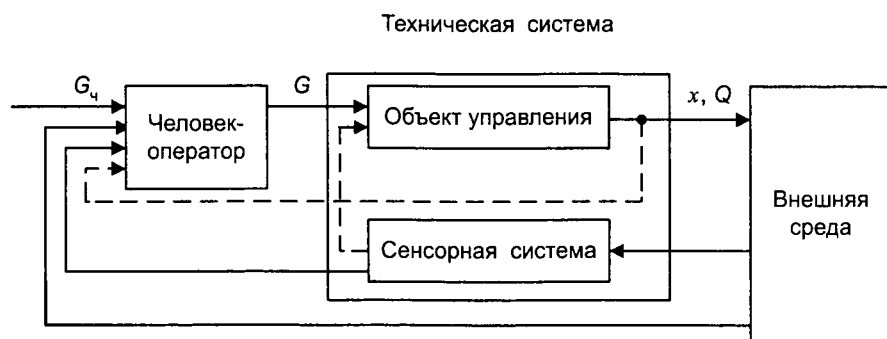


Рис. 10.1. Схема человеко-машинной системы управления

Первый вариант соответствует достаточно сложным операциям и объектам управления. Примеры таких технологических операций в промышленности — свободнаяковка, дуговая сварка сложных изделий, некоторые сборочные и настроечные операции. Примеры таких объектов — мобильные роботы, действующие в сложной непредсказуемой обстановке, космические и подводные манипуляторы.

Ко второму варианту, когда управление от человека может оказаться более предпочтительным, относятся некоторые технологические операции, выполняемые человеком быстрее, лучше и дешевле, хотя они вполне поддаются роботизации (например, некоторые сборочные и сварочные операции) или особо ответственные операции, которые человек не может доверить автомату (некоторые операции в экстремальных ситуациях, в космосе, под водой и т. п.). В последнем случае оптимальным решением обычно и становится комбинация автоматического и автоматизированного от человека-оператора управления.

Однако следует отметить, что практически во всех системах, называемых автоматическими, человек-оператор все-таки тоже эпизодически участвует в процессе управления. Это может быть на этапе программирования, при взятии оператором на себя управления в нештатной ситуации, при оперативной корректировке действий робота в случае изменения ситуации.

Рассмотрим системы управления средствами робототехники со стороны человека-оператора. Чтобы охватить все возможные варианты такого управления, начнем с их классификации.

- В зависимости от уровня в иерархии управления, на котором участвует человек (см. рис. 9.1), различают следующие типы управления:
 - командное управление отдельными приводами на первом уровне управления;
 - управление копирующее и с помощью задающей рукоятки на втором (программном) и третьем (адаптивном) уровнях;
 - супервизорное и интерактивное управление на четвертом уровне.
- По месту нахождения (удалению) человека-оператора относительно управляемого объекта различают:
 - местное управление;
 - дистанционное управление (с механической или электрической связью с управляемым объектом на десятки метров или кабельное управление до сотен метров);
 - телеуправление (управление по каналам связи без ограничения дальности).

В отличие от дистанционного телеуправления означает наличие в системе управления системы связи, в которой передаваемая информация претерпевает преобразование в форму, специально предназначенную для преодоления больших расстояний. При этом такая система связи может оказаться даже сложнее всей остальной системы управления.

- По функциям, выполняемым человеком, возможны следующие варианты его участия:
 - выполнение функций верхних уровней системы управления (обработка сенсорной информации, оценка ситуации, планирование поведения);
 - управление выполнением конкретных технологических операций;
 - программирование.
- По способу подключения человека-оператора к технической системе различают:
 - устройства управления, входящие в состав управляемого объекта (например, робота) и специально предназначенные для управления объектом только человеком-оператором (например, задающий манипулятор в системе копирующего манипулятора);
 - устройства, входящие в состав устройства автоматического управления и предназначенные для перехода к управлению человеком-оператором

(например, переносной пульт оператора для программирования робота методом обучения);

- специальные устройства, выполняющие функции интерфейса "оператор-робот", которые могут подключаться к устройству управления робота для выполнения каких-либо из перечисленных ранее функций по его управлению.

Далее рассмотрим системы управления в соответствии с классификацией по уровню управления.

10.3. Системы командного управления

Такое управление реализуется путем участия человека-оператора на нижнем уровне управления роботом путем управления отдельными приводами и осуществляется обычно в релейном режиме управления перемещением и скоростью.

Командное управление применяется исключительно как дополнительный способ управления, например, в промышленных роботах для их программирования методом обучения или в аварийных и нештатных ситуациях. Точность такого управления определяется умением оператора, через которого замыкается зрительная обратная связь в контуре управления. Быстродействие при этом очень низкое, т. к., во-первых, для получения приемлемой точности такое управление ведется обычно на сниженной скорости, а во-вторых, потому что здесь для перемещения рабочего органа манипулятора в очередную позицию приводы включаются по очереди последовательно.

10.4. Системы копирующего управления манипулятором

Этот способ дистанционного управления манипуляторами человеком-оператором был изобретен для выполнения работ в опасных для человека условиях. Рис. 10.2 иллюстрирует принцип такого управления. Объектом управления является исполнительный манипулятор ИМ, а органом управления им служит задающий манипулятор ЗМ. Задающий манипулятор кинематически подобен исполнительному. Вместо рабочего органа, как у исполнительного манипулятора, у задающего имеется рукоятка, которую оператор держит в своей руке. Звенья манипуляторов связаны таким образом, что оператор, перемещая эту рукоятку, заставляет рабочий орган исполнительного манипулятора повторять это движение. Таким образом, исполнительный манипулятор повторяет, копирует движение задающего. Отсюда название этой манипуляционной системы — *копирующий манипулятор*.

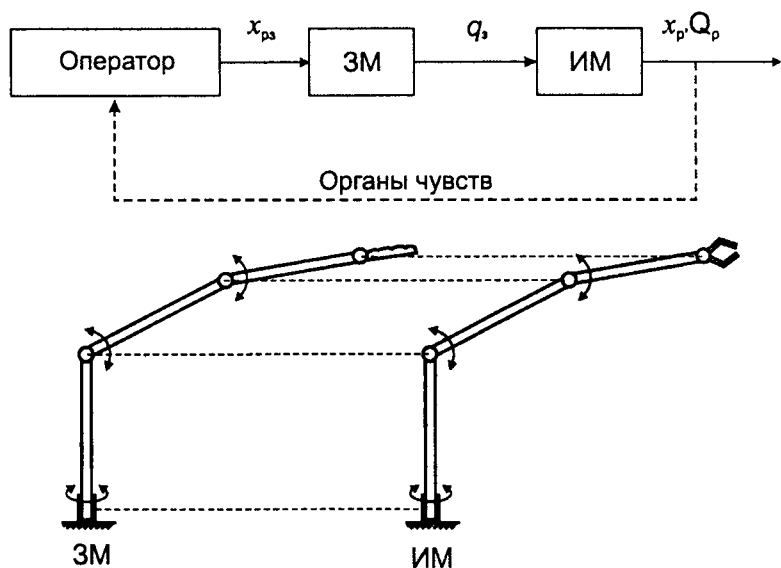


Рис. 10.2. Принцип действия копирующего манипулятора

У первых конструкций таких манипуляторов не было приводов, а звенья исполнительного и задающего манипуляторов были соединены механическими тросами и тягами, посредством которых исполнительный манипулятор перемещался под действием усилия со стороны человека-оператора, приложенного к задающему манипулятору. В следующем поколении копирующих манипуляторов эти механические связи были заменены электрическими в виде синхронных передач. На рис. 10.3 показан внешний вид такой системы из двух копирующих манипуляторов со снятыми с блоков приводов кожухами.

Значительно большие точность, быстродействие и практически неограниченную грузоподъемность имеют копирующие манипуляторы на *следающих приводах*, которые отрабатывают рассогласование датчиков положения соответствующих звеньев обоих манипуляторов. В результате исполнительный манипулятор в целом и его рабочий орган отслеживают положение задающего манипулятора, перемещаемого оператором. Пример такой системы приведен на рис. 1.4.

Задающий манипулятор может быть значительно меньше исполнительного, чтобы лучше соответствовать размерам рабочей зоны руки человека и сократить объем, занимаемый оператором с задающим манипулятором.

Существуют два типа систем копирующих манипуляторов: необратимые или одностороннего действия и обратимые или двустороннего действия. Второй тип отличается от первого наличием силового очувствления рабочего органа. Оператор, перемещая задающий манипулятор, ощущает на своей руке проти-

действующее усилие, пропорциональное усилию, с которым рабочий орган исполнительного манипулятора действует на объекты внешней среды. Это так называемый *эффект отражения усилия*. В предыдущей главе уже говорилось, что такое ощущение необходимо для выполнения движений при наличии внешних связей и препятствий (операции сборки типа вал-втулка и резьбового соединения, силовое сканирование поверхности и т. п.).

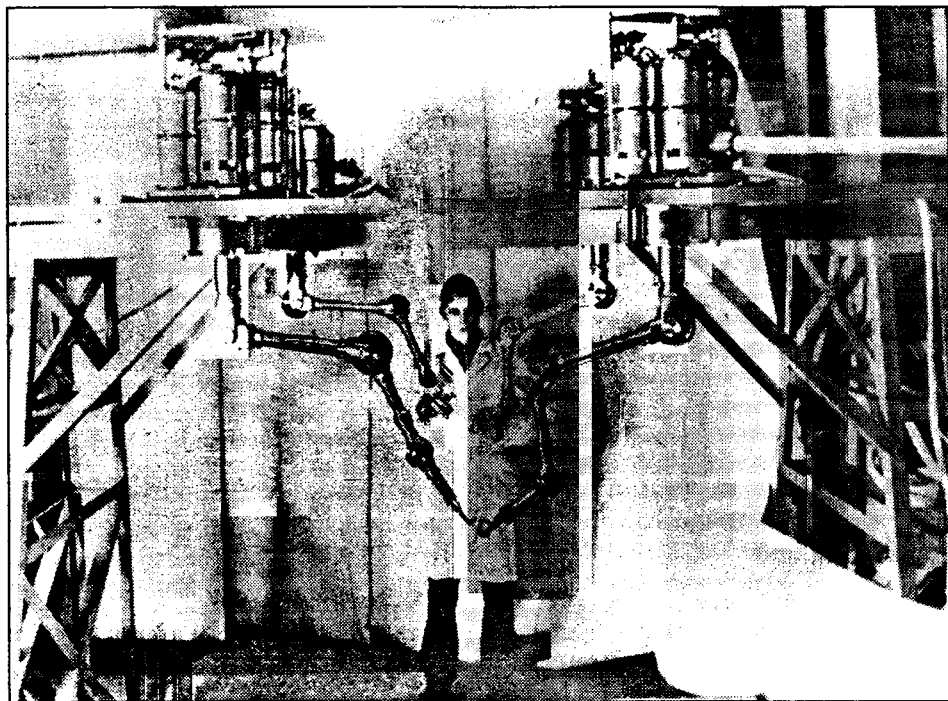


Рис. 10.3. Электрический копирующий манипулятор МЭМ (Россия)

На рис. 10.4 приведена типовая функциональная схема одного канала копирующего манипулятора двустороннего действия со следящими приводами. Эта схема называется симметричной, т. к. в ней задающая и исполнительная части идентичны. На входы их приводов подается с разным знаком рассогласование $\Delta\alpha = \alpha_{\text{и}} - \alpha_3$, где $\alpha_{\text{и}}$ и α_3 — углы поворота приводов степени подвижности соответственно исполнительного и задающего манипуляторов. Скоростная обратная связь, осуществляемая с помощью датчиков скорости ДС_и, ДС_з, создает обычную динамическую коррекцию.

При повороте оператором задающей оси на угол α_3 возникает рассогласование $\Delta\alpha$, которое приводит к созданию на исполнительной оси движущего момента $M_{\text{и}}$, сонаправленного с α_3 и вызывающего изменение $\alpha_{\text{и}}$ в том же

направлении. На задающей стороне под действием этого же сигнала рассогласования $\Delta\alpha$, поступающего с обратным знаком, возникает такой же по величине момент, но соответственно направленный против поворота $\alpha_{и}$, т. е. противодействующий изменению $\alpha_{и}$. Оператор воспринимает этот момент, как если бы он непосредственно поворачивал исполнительную ось, преодолевая сопротивление нагрузки. В этом и заключается эффект отображения усилия.

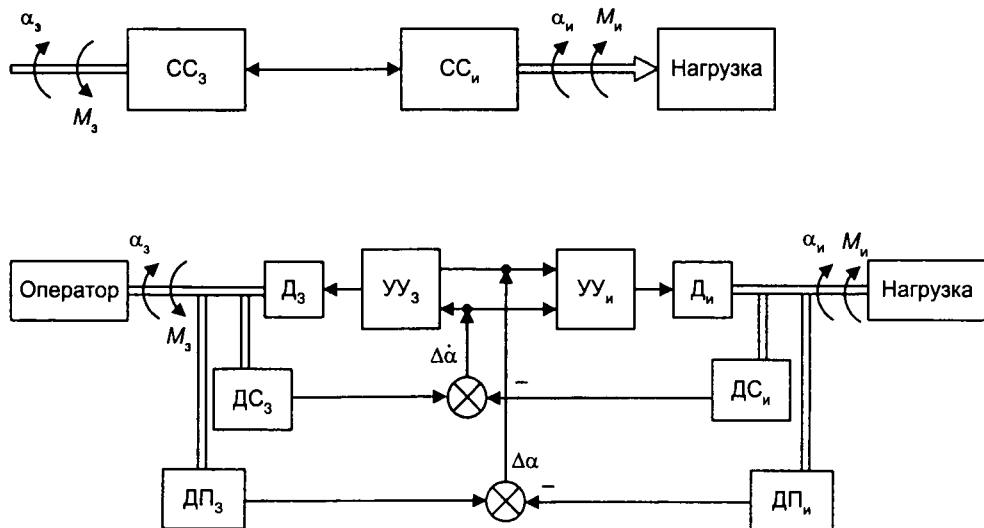


Рис. 10.4. Функциональная схема симметричной системы управления степенью подвижности копирующего манипулятора: УУ_з, УУ_и — устройства управления привода задающего и исполнительного манипуляторов

Динамика системы, показанной на рис. 10.4, в линейном приближении может быть описана следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} J_3 p^2 \alpha_3 + k'_3 p \alpha_3 &= M_3 + W'_3(p) p \Delta\alpha + W_3(p) \Delta\alpha, \\ (J_{и} + J_{н}) p^2 \alpha_{и} + k'_{и} p \alpha_{и} &= -M_{и} - W'_{и}(p) p \Delta\alpha - W_{и}(p) \Delta\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

где $\Delta\alpha = \alpha_{и} - \alpha_3$; $k'_3, k'_{и}$ — коэффициенты демпфирующих скоростных сил; $J_3, J_{и}, J_{н}$ — моменты инерции; $W'_3(p), W_3(p); W'_{и}(p), W_{и}(p)$ — передаточные функции скоростных и позиционных контуров приводов на задающей и исполнительной сторонах.

Выразив из второго уравнения выражение для $\Delta\alpha$ и подставив в первое, получим:

$$M_3 = \frac{W_3(p) + pW_3'(p)}{W_n(p) + pW_n'(p)} [M_n + (J_n + J_n)p^2\alpha_n + k_n' p\alpha_n] + J_3p^2\alpha_3 = k_3' p\alpha_3. \quad (10.2)$$

Полагая задающую и исполнительную системы управления идентичными, можно упростить выражение перед квадратной скобкой следующим образом:

$$\frac{W_3(p) + pW_3'(p)}{W_n(p) + pW_n'(p)} \cong \frac{W_3(0)}{W_n(0)} = \frac{k_3}{k_n} = k_m. \quad (10.3)$$

Здесь k_m — коэффициент масштабирования ощущения оператором нагрузки на исполнительную оси.

С учетом (10.3)

$$M_3 = k_m [M_n + (J_n + J_n)p^2\alpha_n - k_n' p\alpha_n] + J_3p^2\alpha_3 + k_3' p\alpha_3. \quad (10.4)$$

Погрешность отражения усилия

$$\Delta M = M_3 - k_m(M_n + J_n p^2\alpha_n) = (J_3 p^2 + k_3' p)\alpha_3 + k_m(J_n p^2 + k_n' p)\alpha_n.$$

Первый член этого выражения — внутренний момент на задающей стороне, а второй — на исполнительской стороне. В этих членах первое слагаемое определяет погрешность, вызванную инерционностью приводов, а второе — скоростными силами сопротивления.

Для уменьшения этой погрешности в приводах применяют положительную скоростную обратную связь, компенсирующую члены $k_3' p\alpha_3$ и $k_n' p\alpha_n$. Для устранения статической ошибки слежения применяется последовательная коррекция в виде ПИ-звеньев.

Однако кардинальный путь повышения точности отражения усилия — это применение на задающей стороне контура управления непосредственно по разности $M_3 - k_m M_n$. На рис. 10.5 показана соответствующая система управления. Это несимметричная схема, в которой исполнительный привод отрабатывает угол α_3 , в то время как задающий привод отрабатывает момент M_n . Для получения необходимого качества отработки момента здесь также применяются гибкие обратные связи и последовательные корректирующие звенья.

В копирующих манипуляторах для расширения их функциональных возможностей применяют средства адаптации, чтобы при изменении характера задания или внешних условий соответственно изменять алгоритм управления, т. е. структуру системы. Так, например, при выполнении транспортных операций по перемещению грузов или просто перемещению рабочего органа ис-

где k — коэффициент передачи датчиков момента. Здесь первая строка соответствует основному режиму работы системы как обратимой с отражением усилия, вторая — варианту, когда знак M_n совпадает со знаком M_3 и благодаря самотормозящей передаче оператор не ощущает нагрузку M_n . Третья строка соответствует неподвижному состоянию задающей оси, когда $k_m M_n \geq M_3$. Переключение режимов может осуществляться и вручную оператором.

В заключение перечислим возможные режимы работы систем управления копирующих манипуляторов, по-прежнему, применительно к одной степени подвижности.

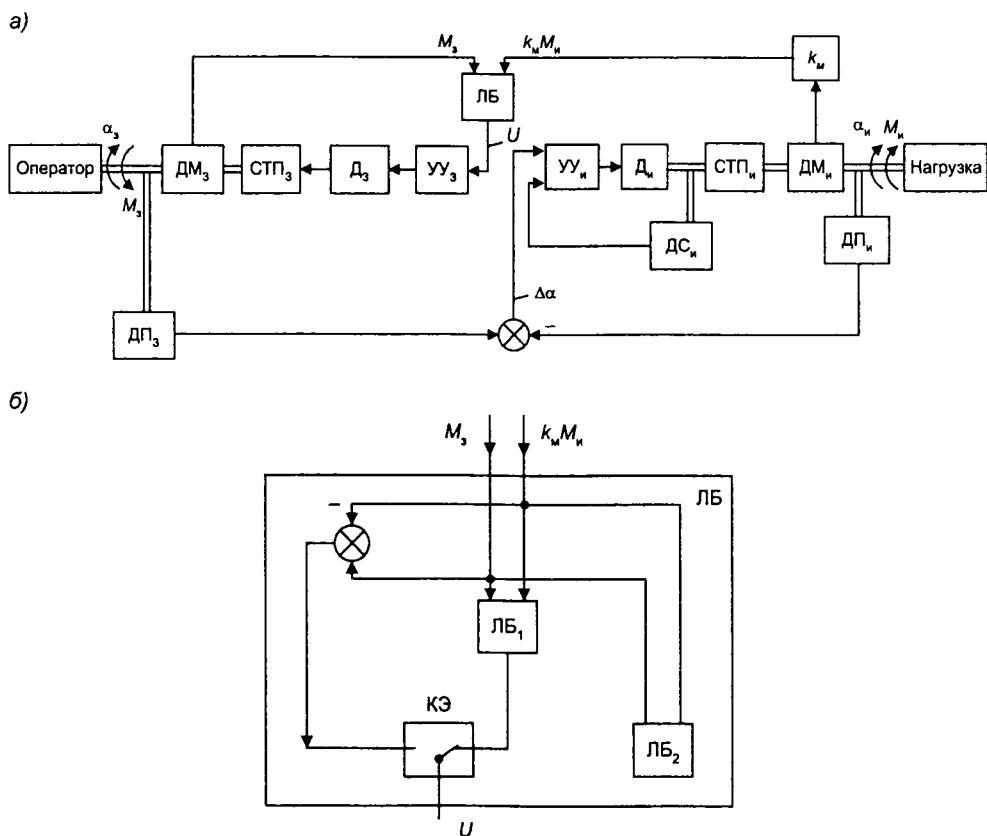


Рис. 10.6. Функциональная схема системы управления с переменной структурой для одной степени подвижности копирующего манипулятора (а) и ее логического блока (б): ДМ — датчики моментов; СТП — самотормозящая передача; ЛБ — логический блок; КЭ — коммутирующий элемент

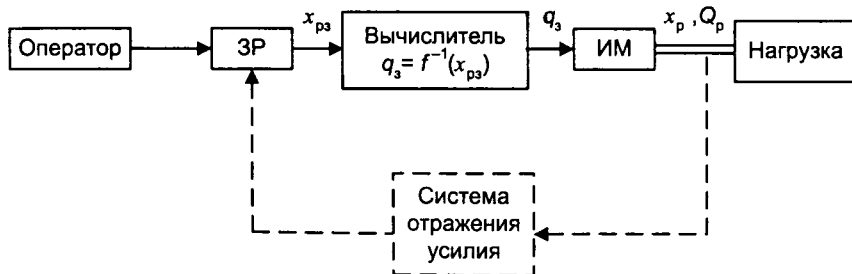
В соответствии с четырьмя переменными на входе и выходе α_n , α_3 , M_3 , M_n возможны следующие четыре режима, в каждом из которых одна из этих переменных является независимой.

1. Режим отработки задаваемого оператором перемещения $\alpha_3(t)$. В этом режиме независимой переменной является $\alpha_3(t)$. Момент M_n — реакция внешней среды, которую оператор преодолевает, перемещая задающую ось.
2. Режим отработки заданного момента $M_3(t)$. Здесь оператор, перемещая задающую ось и чувствуя возникающее при этом противодействующее усилие, поддерживает заданную величину этого усилия. Такой режим требуется по отдельным степеням подвижности при выполнении манипулятором операций, связанных с дозированным силовым воздействием на объект внешней среды (очистка и полировка поверхности, резка и т. п.).
3. Режим задаваемого извне вынужденного движения исполнительной оси $\alpha_n(t)$. Задача оператора в этом режиме — приложить к исполнительной оси определенное усилие M_n . Операцией, требующей такого управления, может быть силовое участие в вынужденном движении исполнительной оси. Пример такой операции — участие в перемещении какого-то объекта совместно с другим средством, которое определяет траекторию этого движения.
4. Режим компенсации (уравновешивания) момента нагрузки $M_n(t)$. К исполнительной оси приложено извне произвольно изменяющееся усилие, которое оператор должен уравновешивать, создавая противоположного знака момент $M_3(t)$ и тем самым препятствуя перемещению исполнительной оси под действием этого внешнего усилия.

10.5. Системы управления с задающей рукояткой

Принцип действия этих систем управления поясняет рис. 10.7. Задающая рукоятка — джойстик с вычислителем выполняет ту же функцию, что и задающий манипулятор в системе копирующего манипулятора на рис. 10.2, т. е. по задаваемой рукой оператора траектории рабочего органа манипулятора $x_{p3}(t)$ определяются задания $q_3(t)$ его приводам. Однако здесь это делается с помощью математической модели манипулятора путем решения обратной задачи кинематики.

а)



б)

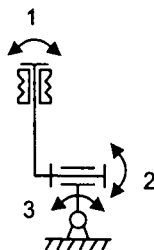


Рис. 10.7. Функциональная схема системы управления с задающей рукояткой (ЗР)

На рис. 10.7, б показан вариант кинематической схемы трехстепенной шарнирной задающей рукоятки. Каждая степень подвижности оснащена датчиком положения. Оператор, смещая своей рукой задающую рукоятку с нейтрального положения, задает с помощью этих датчиков координаты x_{pz} рабочего органа манипулятора. Вычислитель по ним определяет задания для приводов q_3 .

Для управления движением рабочего органа в общем случае требуется задавать 6 координат — 3 переносные и 3 ориентирующие угловые. Для их задания применяются две трехстепенные задающие рукоятки — одна для управления перемещением, а другая для ориентации рабочего органа. Существуют также и шестистепенные рукоятки.

Преимущества задающей рукоятки по сравнению с задающим манипулятором следующие:

- ☐ минимальное число степеней подвижности, не связанное с числом степеней подвижности управляемого манипулятора, и соответственно большая простота и компактность;
- ☐ возможность реализации большего числа различных режимов управления, а именно:
 - управление по положению — позиционное;

- управление по скорости — скоростное;
- управление по силе — силовое.

При описании принципа действия системы управления с задающей рукояткой (рис. 10.7) имелся в виду позиционный способ управления. В этом случае перемещение задающей рукоятки определяет уставку абсолютных координат рабочего органа x_{p3} . По ней вычислитель определяет задания приводам

$q_3 = f^{-1}(x_{p3})$, отработку которых и выполняет исполнительный манипулятор

ИМ, перемещая рабочий орган в заданную позицию. Таким образом, этот способ управления идентичен системе с задающим манипулятором.

Скоростной способ управления означает, что смещение задающей рукоятки с нейтрального положения задает вектор скорости рабочего органа манипулятора, т. е. направление смещения рукоятки определяет направление движения, а величина смещения — величину скорости движения рабочего органа. Меняя положение задающей рукоятки в ходе движения манипулятора, оператор может маневрировать его рабочим органом в реальном масштабе времени. Вычислитель при этом рассчитывает задания для скоростей приводов $\dot{q}_3 = f^{-1}(\dot{x}_{p3})$, а те обрабатывают их в режиме скоростных следящих систем.

Такой способ наиболее удобен для управления транспортными операциями в свободном пространстве, т. е. при отсутствии препятствий.

Силовой (сило-моментный) способ управления предполагает, что перемещение задающей рукоятки определяет вектор силы, с которой рабочий орган должен воздействовать на объекты внешней среды. Приводы манипулятора в этом случае имеют соответственно управление по силе (см. параграф 8.5) и обрабатывают рассчитываемые вычислителем уставки для силы (момента)

$$Q_{пз} = J^T(Q_{p3}).$$

Этот способ управления применяется при выполнении технологических операций, требующих управляемого силового воздействия на объект операции. В этом случае задающая рукоятка должна иметь силовое ощущение, создающее эффект отражения усилия, действующего на рабочий орган манипулятора, как в копирующих манипуляторах (см. пунктирные линии на рис. 10.7, а).

Для выполнения конкретных операций часто применяют следующие комбинации этих трех способов управления.

- *Скоростно-позиционное управление.* Здесь для осуществления чисто транспортного движения в свободном пространстве применяется скоростное управление, а для выполнения последующих точных технологических

операций, например, сборочных, — позиционное. Переход от одного способа управления к другому может осуществляться самим оператором или автоматически в функции от отклонения рукоятки. При приближении рабочего органа манипулятора к месту выполнения операции, требующей позиционирования, оператор снижает скорость движения, приближая задающую рукоятку к нейтральному положению. Автоматическое переключение на позиционное управление осуществляется при этом в функции от отклонения задающей рукоятки, т. е. от величины скорости, когда последняя становится достаточно малой. Само переключение заключается в изменении алгоритма работы вычислителя.

- *Скоростно-силовое управление.* В отличие от предыдущего способа здесь при подходе к месту выполнения технологической операции осуществляется переход не к позиционному, а к силовому управлению, которое требуется для выполнения данной операции. Для автоматического изменения способа управления может использоваться сигнал о контакте с объектом выполнения операции, получаемый от датчика силы (момента), находящегося в контуре силового управления.
- *Позиционно-силовое управление.* Здесь последовательно осуществляются эти два способа управления.
- *Скоростно-позиционно-силовое управление.* В этом случае в последовательности, определяемой технологической операцией, осуществляется применение всех трех способов управления.

Системы управления, в которых используются рассмотренные комбинации нескольких способов управления, относятся к адаптивным системам с переменной структурой. Изменение структуры, как отмечалось ранее, может осуществляться автоматически или оператором.

10.6. Системы супервизорного и интерактивного управления

Супервизорный способ управления представляет собой последовательность автоматически выполняемых роботом заранее занесенных в его память типовых операций, в промежутках между которыми оператор задает очередную операцию, обеспечивая, таким образом, выполнение определенной сложной работы. Директивы оператора включают два вида информации: название (код) типовой операции и ввод численных значений некоторых параметров программы этой операции. Типичным видом последней информации являются необходимые для выполнения операции координаты объектов внешней среды (координаты подлежащих взятию предметов или места, куда требуется вывести рабочий

орган манипулятора, и т. п.). Их ввод может осуществляться через систему целеуказания с помощью, например, световой метки на экране дисплея, светового пера, мыши или средств виртуальной реальности в компьютерном трехмерном пространстве. Сама операция может задаваться через клавиатуру, в т. ч. виртуальную на сенсорном экране дисплея, с помощью речевого командного устройства и других средств общения.

Более совершенное *интерактивное (диалоговое) управление* предполагает двустороннюю, т. е. диалоговую, связь с роботом. Робот (его устройство управления) после получения определенного задания может запросить у оператора недостающую для его выполнения информацию или какие-либо уточнения, сообщить о невыполнимости какой-то операции с указанием причин, о возникновении неисправности и т. п. В свою очередь оператор может запрашивать у робота дополнительную информацию о состоянии его отдельных систем, содержании памяти, дополнительную сенсорную информацию о внешней среде. Для реализации диалогового режима в развитой форме, включая речевой обмен, требуется интеллектуальный интерфейс "оператор-робот" (см. параграф 9.3).

Рассмотренные в этой главе способы управления от человека-оператора обычно применяются совместно с автоматическим управлением. Описанные в данном параграфе системы являются примерами именно таких комбинированных систем. В промышленных роботах с программным управлением широко используется способ программирования обучением, основанный на управлении со стороны оператора. Наоборот, в системах, где основным способом управления является управление от человека-оператора, стремятся отделить отдельные операции, которые могут выполняться автоматически, осуществлять в автоматическом режиме. Объединять эти два типа управления можно как последовательно, когда один тип управления сменяется другим, так и параллельно, когда, например, человек-оператор корректирует ход в целом автоматически выполняемой операции.

На рис. 10.8 демонстрируется вариант такого комбинированного управления роботом. Через блок программирования БП осуществляется автоматическое управление движением исполнительных систем робота. Через задающую рукоятку ЗР оператор может корректировать этот процесс (в том числе, как показано на схеме, в режиме силового управления с отражением усилия) или полностью брать на себя управление, например, в аварийных ситуациях. Кроме того, он может включаться в процесс в режиме супервизорного управления через блок программирования.

На рис. 10.9 в качестве примера показана схема управления двумя бортовыми манипуляторами многоразового космического корабля Буран, которая реализует следующие режимы управления [1]:

- автоматическое программное управление типовыми технологическими операциями (взятие полезного груза в грузовом отсеке корабля или с орбиты, перемещение груза или рабочего органа ненагруженного манипулятора в заданную точку окружающего пространства, выполнение какой-либо запланированной технологической операции);

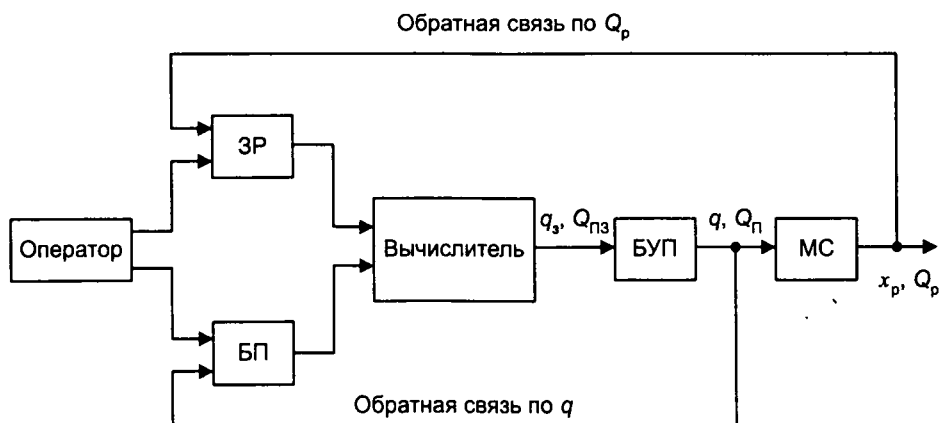


Рис. 10.8. Функциональная схема системы комбинированного автоматического и автоматизированного управления от задающей рукоятки:

БП — блок программирования; БУП — блок управления приводами

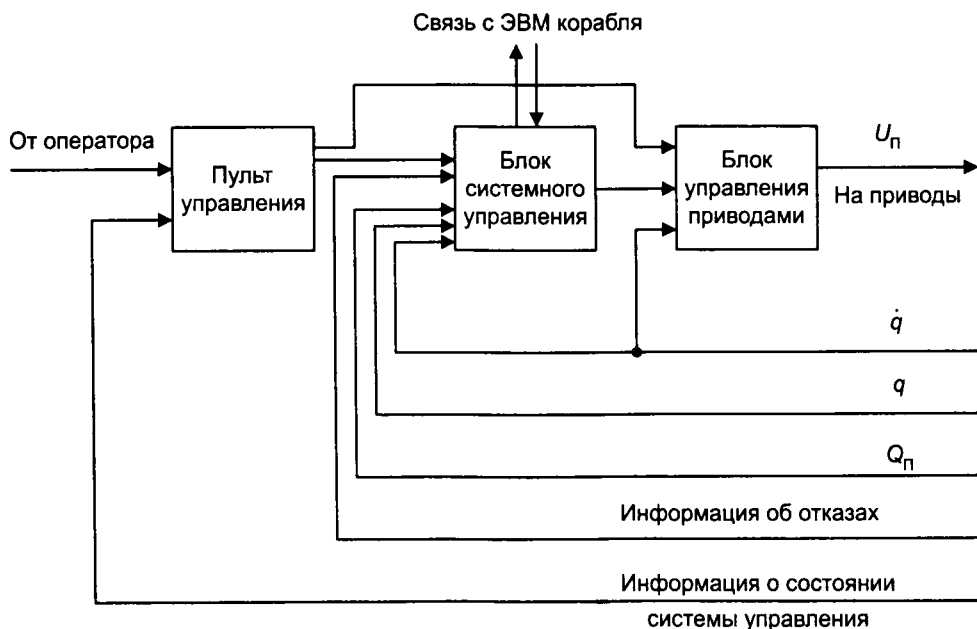


Рис. 10.9. Состав устройства управления бортовых манипуляторов космического корабля Буран

- ☐ автоматизированное управление с помощью задающих рукояток и телевизионной системы целеуказания;
- ☐ ручное командное управление отдельными приводами манипулятора, подвижными передающими телевизионными камерами и светильниками, расположенными на бортах корабля.

Оба манипулятора идентичны, имеют шарнирную кинематику с 6 степенями подвижности на электроприводах.

Алгоритмы автоматического управления включают решение задачи планирования путем построения программных траекторий с учетом препятствий. Последние моделируются простыми телами: параллелепипедом, цилиндром, шаром, а траектория — кубическим сплайном. В описании динамики манипулятора учитываются его гибкость и нелинейности, включая сухое и вязкое трение.

В системе управления с помощью задающих рукояток применены две трех-степенные рукоятки: одна для управления переносными, а другая — ориентирующими степенями подвижности рабочего органа. Алгоритм управления основан на решении обратной задачи кинематики для скорости. При этом для того, чтобы оператор мог осуществлять управление манипулятором по одним и тем же правилам вне зависимости от места расположения используемых передающих телекамер, а также при наблюдении через иллюминатор кабины, используется специальный алгоритм интерпретации задающих рукояток, при котором наблюдаемая оператором картина не зависит от используемого визуального канала [17].

Математическое обеспечение системы управления реализует:

- ☐ алгоритмы управления для перечисленных ранее режимов;
- ☐ алгоритмы диагностики системы, включая ее программное обеспечение;
- ☐ математические модели рабочей зоны манипуляторов и самих манипуляторов, используемые при их программировании.

10.7. Особенности управления человеком-оператором средствами передвижения

Ранее при рассмотрении систем управления в качестве основного объекта управления брались прежде всего манипуляционные системы. Остановимся теперь на особенностях управления со стороны человека-оператора средствами передвижения роботов. Общая функциональная схема управления движением мобильного робота с участием человека-оператора была описана

в параграфе 9.4 (рис. 9.14). Из рассмотренных способов управления оператором для управления передвижением робота не применяется, естественно, только система копирующего управления.

Командное управление в данном случае приводами колес шасси робота применяется для выполнения дискретных команд "вперед-назад", "влево-вправо" с дискретным заданием скорости движения и команды "стоп". Кроме того, такое управление используется для подвижных, обычно двухступенных, передающих телевизионных камер и локаторов обзора местности, а также различного навесного оборудования, которым может быть оснащено шасси робота. Управление с помощью задающей рукоятки — основной способ дистанционного управления (по кабелю или радиоканалу) мобильными роботами.

О применении супервизорного управления в мобильных роботах говорилось в параграфе 9.4.

Интерактивный режим управления имеет особенно большое значение при движении мобильных роботов в неизвестной среде. В этом случае диалоговый режим часто необходим при планировании маршрута, а также при возникновении непредвиденных препятствий. Как правило, возможность оперативного подключения при этом человека-оператора особенно важна.

Системы управления мобильных роботов подводного, воздушного и космического базирования имеют в целом ту же функциональную структуру и используют те же способы управления, что и наземные роботы. Однако, конечно, они отличаются системами передвижения и динамикой.

Основные тенденции развития систем управления мобильных роботов со стороны человека-оператора следующие:

- ☐ развитие систем отображения внешней ситуации вокруг робота, включая ее трехмерную визуализацию (виртуальная реальность) и реализацию эффекта присутствия оператора непосредственно у робота;
- ☐ развитие интеллектуальной компьютерной среды информационной поддержки оператора, основанной на моделировании и прогнозировании в реальном времени поведения робота и состояния окружающей среды;
- ☐ развитие чисто электронных, лишенных подвижных механических частей, средств управления роботом от оператора (очувствительные экраны, перчатки и т. п.).

ГЛАВА 11

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

11.1. Задачи группового управления

Групповое управление — это совместное связанное управление несколькими объектами, например, роботами. Основной целью такого управления является обеспечение выполнения группой объектов общей технологической операции с определенным распределением между ними отдельных ее частей. Кроме того, оно может требоваться и для предотвращения взаимных помех, например, столкновений движущихся объектов при выполнении ими самостоятельных операций.

Примеры задач группового управления:

- ☐ управление производственным оборудованием, например, в составе технологической линии, совместно реализующим общий технологический процесс;
- ☐ управление группой подвижных объектов (летательные аппараты, автомашины и т. п.), движущихся строем или решающих другую общую задачу;
- ☐ управление электрогенерирующими агрегатами электроэнергетической системы, работающими на общую нагрузку, обеспечивающее заданное распределение ее между агрегатами.

Применяемые в робототехнике системы группового управления могут быть разделены на следующие иерархические уровни:

- ☐ совместное управление приводами исполнительных систем роботов;
- ☐ управление несколькими манипуляторами одного робота;

- ☐ совместное управление несколькими роботами;
- ☐ управление роботами и совместно работающим с ними другим технологическим оборудованием в составе технологических комплексов.

11.2. Групповое управление в живой природе и в обществе

Робототехника еще очень долго будет учиться у живой природы, в том числе это относится к управлению. Поэтому начнем рассмотрение проблемы группового управления роботами с анализа группового управления в природе и обществе.

В мире животных существуют постоянные и временные сообщества. Их основная цель — повышение выживаемости. Наименьший такой коллектив — семья; более крупные — стаи зверей, птиц и, наконец, самые многочисленные коллективы сформировались у муравьев, пчел, ос и других насекомых, живущих сообществами.

Принципы организации и управления у таких коллективов прежде всего включают *централизованное* управление, *специализацию* функций членов коллектива (причем тем большая и более узкая, чем крупнее коллектив) и *сочетание общих целей с индивидуальными*. При этом в рамках коллективных действий общие цели имеют приоритет (вплоть до самопожертвования отдельных особей ради общего блага).

Индивидуальные интересы проявляются лишь настолько, насколько это позволяет центральная власть вожака (например, при дележе добычи и т. п.). В больших коллективах одновременно со специализацией возникает *иерархия*. (Например, в муравейниках, в пчелиных роях.) При этом если в немногочисленных группах их вожаки еще участвуют во всех действиях остальных членов группы ("делай как я, делай лучше меня"), реализуя принцип управления "с ведущим (лидером)", то в более крупных сообществах с возникновением иерархической структуры их руководители ограничивают свои функции чисто управленческими, а с дальнейшим усложнением этих функций возникают целые подобные функциональные уровни.

Когда это целесообразно для выживания, возникают и временные коллективы. Например, в северных районах волки зимой сбиваются в стаи во главе с наиболее опытным и сильным вожаком. Птицы при сезонных дальних перелетах летят определенным строем, тоже возглавляемым вожаком. Воробьи и многие другие мелкие птицы сбиваются во временные группы без выделения вожака для большей безопасности и коллективного поиска корма. Аналогичные примеры известны и у рыб и других водных животных.

В таких коллективах возникли три основных способа управления — централизованное (вожаком), децентрализованное (взаимная координация действий) и чисто стайное, когда каждый член стаи самостоятельно преследует общую цель.

В основе человеческого общества также лежит коллективное поведение. Типовая форма организации и управления, сформировавшаяся в результате длительного многовекового опыта, — это централизованная иерархическая система, в которой один человек управляет не более чем 10—12 подчиненными. (Этим числом определяется предельное количество заместителей руководителей крупных формирований, численность подразделений нижнего уровня (лабораторий, секторов и т. п.) и структура последующих уровней (отделов, цехов, отделений и т. д.).)

Существуют и более сложные управляемые структуры *матричного типа*, в которых наряду с вертикальной подчиненностью имеются еще горизонтальные управляющие связи. Последние, однако, замыкаются тоже на верхнее руководство, имея свои функции, отличные от функций, реализуемых вертикальной системой связей. Возникают и более сложные многофункциональные структуры с тремя и более параллельными управляющими системами, замыкающиеся на общие исполнительные объекты и выполняющие разные управляющие и контрольные функции. (Например, наряду с основной административной структурой могут параллельно существовать наложенные на нее структуры управления качеством, социальные и т. д.)

Аналогично строятся более крупные структуры — отраслевые, региональные и т. д. вплоть до глобальных в большой энергетике, на транспорте, связи, в компьютерных сетях.

Групповое управление везде начиналось с централизованного как наиболее простого алгоритмически. Последующая тенденция — постепенное развитие децентрализации с передачей на местный уровень части функций центра. Основные очевидные достоинства такого подхода — наилучший учет местных условий, наибольшая точность относительной координации соседних объектов и надежность, а также освобождение от таких недостатков централизованного управления как большая размерность и объем обработки всей информации в центре, полная зависимость от центра и связей с ним.

Наиболее четкая формализованная структура управления существует в армии: единый главнокомандующий армии, дивизии, полка, роты, отделения (для пехоты). Внутри каждого такого уровня — параллельные координационные связи. Ранее в СССР, когда в армии существовала система политработников, она дополняла указанную выше основную структуру, создавая подобие матричной структуры.

Командир самого нижнего уровня (командир отделения, пилот ведущего летательного аппарата и т. д.) наряду с функцией ведущего выполняет вместе с остальными членами его группы те же действия, что и последние, включая взаимную координацию и поддержку. С повышением уровня командира увеличивается временной отрезок, на который он должен прогнозировать ситуацию и планировать поведение подчиненных групп, что приводит к постепенному переходу от задач тактики к задачам стратегии. В соответствии с усложнением этих задач для их решения создаются свои чисто управленческие группы (штабы) и требуются все более сложные способы решения, включая основанные на опыте интуитивные, творческие.

Аналогично функционируют и группы в спорте (футбол, баскетбол и т. д.) во главе со своими капитанами и тренерской группой.

Обобщая изложенный опыт, сформулируем основные принципы групповой организации и управления, которые выработаны в природе и человеческом обществе и могут быть полезны в робототехнике:

1. Основу всех систем группового управления составляют следующие типы управления: централизованное, с ведущим, децентрализованное, стайное и их комбинации. Последние могут осуществляться во времени (последовательно) и в пространстве (параллельно).
2. В общем случае структуры группового управления являются иерархическими с функциональной специализацией по уровням и выработанными оптимальными значениями численности объектов на каждом уровне.
3. Одни и те же объекты управления могут входить в состав нескольких структур, преследующих разные, но не антагонистические цели. (В том числе такие параллельные структуры могут состоять из одних и тех же объектов.)
4. Управление этими структурами соответственно также является в общем случае иерархическим и комбинированным, сочетая принципы централизованного и децентрализованного управления. Первый — реализует общесистемные цели, а второй — осуществляет координацию действий членов своей группы и адаптацию к местным условиям.
5. Эволюция систем группового управления идет в направлении увеличения децентрализации с сохранением за центром только обеспечения общесистемных не поддающихся декомпозиции функций группы.
6. Группы нижнего уровня могут иметь децентрализованное управление с параллельным централизованным управлением объектами группы, осуществляемым с верхнего уровня, или с выделением в группе централизованно управляемого ведущего объекта.

11.3. Принципы группового управления роботами

Из изложенного можно сделать следующие общие рекомендации для организации и управления группами роботов.

1. Общее решение этой задачи — иерархическая комбинированная централизованно-децентрализованная система группового управления.
2. Ее основа — нижний уровень децентрализованного управления и поведения с распределением общей цели между роботами. Ключевая проблема группового управления роботами — оптимизация состава роботов этого уровня, включая их число, специализацию, способы распределения общей цели и, наконец, координацию действий отдельных роботов между ними.
3. Для решения последней задачи необходимо руководствоваться критериями оптимальности, соответствующими конкретным целям. Ими могут быть время достижения цели (быстродействие), общие энергозатраты, стоимость и т. п., а также комбинация подобных критериев при заданных ограничениях других показателей (надежность, ресурс, возмущающие воздействия и т. п.). Основные варьируемые параметры при заданной общей цели — это число роботов, распределение между ними этой цели, соответствующая их специализация, объем информационного обмена между роботами.
4. Следующая задача — разработка структуры всей иерархической системы управления группой роботов вплоть до верхнего уровня целеполагания и планирования, а также технической диагностики и восстановления функционирования группы при отдельных отказах и т. д. применительно к конкретным назначениям и целям группы.
5. Наконец, последняя задача — разработка алгоритмов обработки информации и управления для систем управления синтезированных таким образом. Во временном аспекте эта задача подразделяется на две: задачу оценки ситуации, принятия решений к действию и планирования этих действий и задачу непосредственного управления этими действиями в динамике. Первая задача реализуется в основном до начала самих действий, но с возможностью оперативной корректировки уже в ходе этих действий, а вторая — непосредственно в процессе управления в реальном масштабе времени. Этим указанные задачи принципиально различаются.

Наиболее сложными данные задачи оказываются в условиях организованного противодействия со стороны другой группы роботов (или объектов другого типа), когда условием успеха становится быстрота и неординарность реакций на действия противника.

Продemonстрируем возможный подход к синтезу структуры группового управления на уровне планирования по критерию обеспечения заданного времени выполнения этой задачи [18]. На рис. 11.1 приведены качественные зависимости времени принятия решения в системе группового управления, использующей различные способы управления, от числа объектов в группе.

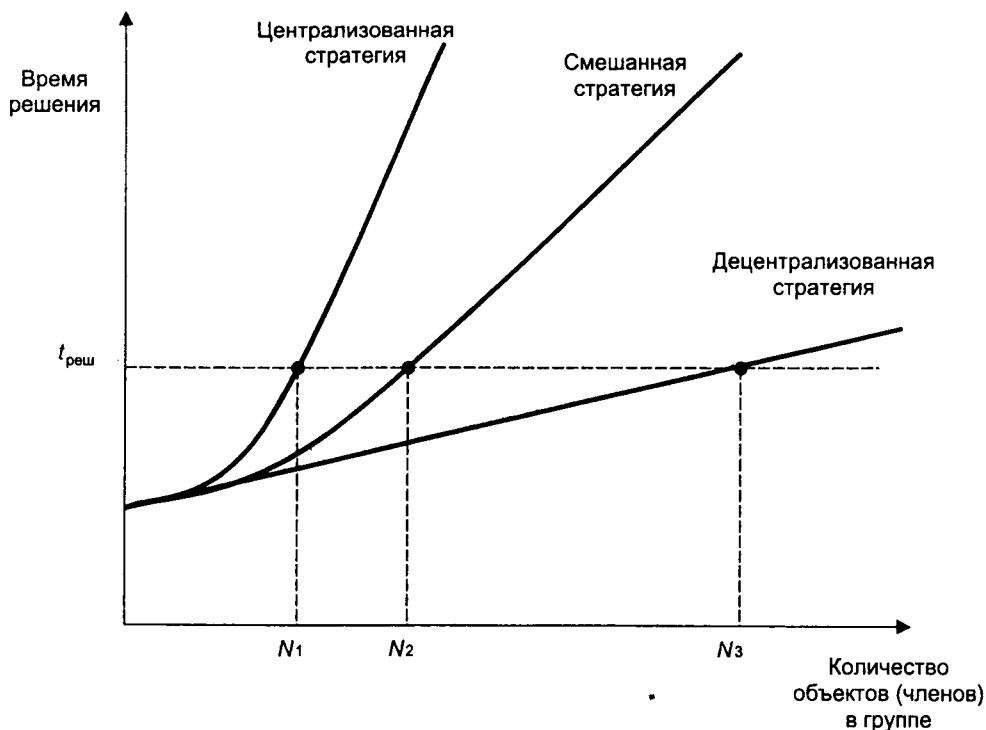


Рис. 11.1. Зависимость времени принятия решения от способа группового управления

При централизованном управлении центр принимает решение о действиях всех подчиненных ему объектов группы. При этом сложность задачи возрастает экспоненциально с ростом числа объектов в группе и соответственно экспоненциально возрастает время ее решения. При использовании же децентрализованного группового управления каждый объект группы принимает решения только за себя, обмениваясь информацией с другими членами группы с целью оптимизации группового решения. Поэтому время группового решения в такой группе возрастает линейно при увеличении числа ее членов. График времени решения при использовании смешанного способа управления будет находиться где-то между двумя описанными графиками.

Из графика на рис. 11.1, зная количество объектов в группе и требуемое значение времени группового решения $t_{\text{реш}}$, можно выбрать способ управления, который более приемлем в данном случае. Например, если число объектов меньше N_1 , то предпочтительнее использование централизованного управления, поскольку оно обеспечивает более оптимальное групповое решение. Если число объектов в группе лежит в пределах от N_1 до N_2 , целесообразно смешанное управление. Если число объектов находится между N_2 и N_3 , то следует использовать децентрализованное управление — наименее трудоемкое с точки зрения временных затрат на принятие решения. Если же число объектов в группе больше N_3 , следует переходить к иерархическому разбиению группы на подгруппы и, используя децентрализованное управление, сначала обеспечить распределение задания между подгруппами, а затем, используя тот же подход, принимать решения о способах управления объектами внутри каждой подгруппы.

При дальнейшем увеличении числа объектов в группе необходимо соответственно увеличивать число уровней иерархии, чтобы "вписаться" в требуемое время принятия группового решения. Значение требуемого времени решения $t_{\text{реш}}$ зависит от условий, в которых должна функционировать группа. Например, если это группа промышленных роботов с программным управлением, функционирующих в стационарных условиях, то ограничения на время решения задачи их группового управления практически не накладываются, поскольку эта задача может быть решена заранее, а результаты решения могут быть заложены в программы. Если же роботы должны функционировать в условиях заранее неизвестных, то такой подход уже не применим. В этом случае необходимо принимать групповое решение в темпе изменения ситуации в среде. Если ситуация меняется медленно, например, если роботы используются просто для исследования некоторой местности, возможно применять смешанное групповое управление, при котором из центра поступают задания для каждой подгруппы роботов, а внутри подгруппы используется децентрализованное управление. Если же ситуация меняется очень быстро, как, например, в боевой обстановке, то и решение о групповых действиях надо принимать быстро, вплоть до отказа от поиска оптимального решения. В этом случае необходимо использовать децентрализованное управление.

Планирование гипотетических крупномасштабных действий боевых роботов должно осуществляться, как правило, до их начала, что позволит центру оптимизировать действия всех подчиненных ему крупных подразделений, используя стратегию централизованного управления. В процессе боевых действий центр крупного подразделения уже не имеет достаточного времени на принятие решения и поэтому вынужден использовать смешанное групповое управление, отдавая приказы для подразделений и оставляя за ними возмож-

ность действовать самостоятельно внутри подразделения. Как только некоторая боевая группа ввязывается в контактный бой, командовать членами группы уже бесполезно, поскольку у них нет времени на "прием" этих команд. Группа должна предельно быстро принимать решения, как уничтожить противника и минимизировать свои потери. Поэтому здесь приемлема только стратегия децентрализованного управления.

Простейший случай группового управления в робототехнике — это управление системой приводов одного манипулятора. Практически всегда — это уже рассмотренное ранее *централизованное параллельное управление* приводами. Как было отмечено, простота такого управления покупается завышенными требованиями к точности управления отдельными приводами по сравнению с требуемой точностью позиционирования рабочего органа манипулятора, которая при таком управлении определяется совокупностью погрешностей всех приводов.

С ростом требований к точности управления абсолютными координатами рабочего органа возникает необходимость переходить к пока еще редко применяемому из-за своей сложности управлению непосредственно по этим координатам и оснащать манипулятор соответствующей сенсорикой. (Управляющие воздействия на отдельные приводы рассчитываются при этом решением обратной задачи кинематики или динамики в зависимости от требуемого быстродействия манипулятора.) В результате происходит переход к *управлению с ведущим*, где роль ведущего звена играет рабочий орган манипулятора. Такой способ управления был предложен, в частности, для движения манипуляторов в стесненных условиях типа лабиринта.

С развитием систем адаптивного и интеллектуального управления роботами в них также развивается тенденция децентрализации путем распределения между отдельными его системами задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, знаний и т. д. Первоначально аппаратной базой этого стали транспьютеры, а затем технические нейронные сети.

Однако основная область группового управления в робототехнике — это управление несколькими роботами, выполняющими общую задачу. Простейший вариант такого управления — синхронизация выполняемых отдельными роботами или другими средствами робототехники операций, т. е. согласование их действий во времени. Это требуется при выполнении группой роботов общей работы, которая распадается на последовательно выполняемые отдельными роботами технологические операции. При этом рабочие зоны этих роботов не пересекаются и, следовательно, опасность столкновения их манипуляторов отсутствует. Пример — управление группой роботов на сборочной линии, где роботы последовательно выполняют пооперационную сборку какого-либо изделия.

Следующая по сложности задача группового управления роботами — это координация их движения в пространстве. Простейший пример — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Для манипуляторов это может иметь место при одновременной работе, когда их рабочие зоны перекрываются. Предельный случай — это работа манипуляторов на общем рабочем месте, например, в составе сборочного центра. Общее решение здесь — применение системы децентрализованного управления как системы безопасности от столкновений. Однако при возможности программно обеспечить с достаточным запасом несоприкосновение манипуляторов возможно применение и централизованного управления без контроля относительных координат или с их контролем, но уже в качестве дополнительной системы аварийной блокировки.

Еще более сложная задача — это обеспечение совместной работы манипуляторов с координацией движений одновременно и в пространстве, и во времени, т. е. координация траекторий движения в реальном масштабе времени. Примером может быть операция сборки путем механического соединения деталей, перемещаемых манипуляторами. Перемещение деталей в зону сборки может осуществляться с помощью централизованного управления. Однако сама операция сборки требует перехода к децентрализованному управлению относительными координатами.

Следующая по сложности задача группового управления — управление гибкими производственными системами, в которых промышленные роботы функционируют совместно с различным технологическим оборудованием, транспортной и складской системами. Эти системы будут рассмотрены в главе 14 (параграф 14.5). На рис. 11.2 показан состав такой гибкой производственной системы.

Каждая из показанных на рис. 11.2 систем имеет многоуровневую структуру. Уровни внутри системы соединяются друг с другом по вертикалям, а между системами — по горизонталям, т. е. на своих иерархических уровнях. В табл. 11.1 показаны эти уровни. Их четыре: 1 — единица технологического оборудования, 2 — технологическая ячейка, 3 — технологический участок и 4 — цех. Внутри этих основных уровней могут быть еще свои подуровни. В технологических ячейках роботы и другие средства робототехники могут применяться на основных и вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования (роботизированная технологическая ячейка). В первом случае все части ячейки находятся обычно под управлением устройства управления робота. Во втором случае устройство управления робота обычно подчиняется устройству управления основного технологического оборудования. Однако возможна и обратная взаимосвязь. Например, в технологических модулях холодной штамповки часто управле-

ние прессом осуществляется от устройства управления обслуживающего его робота.

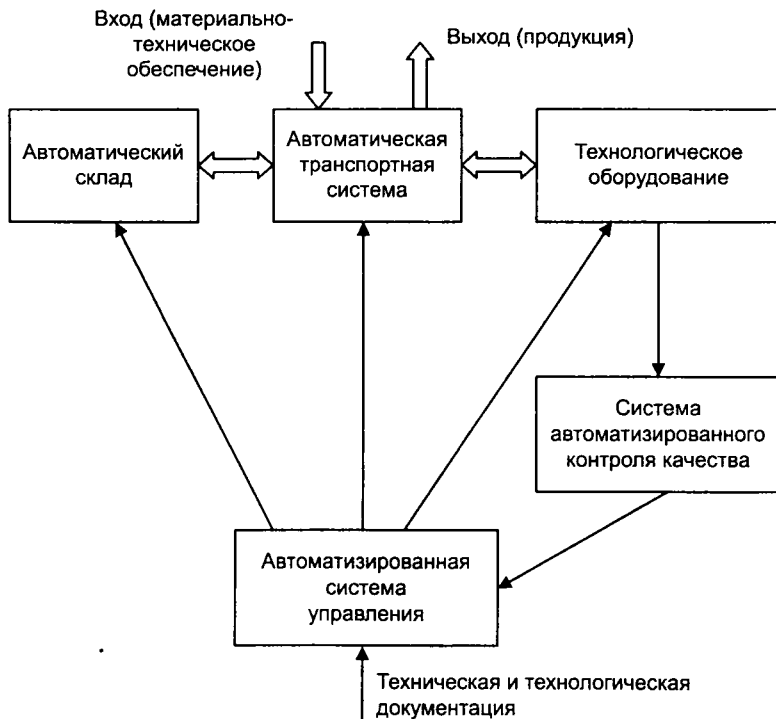


Рис. 11.2. Состав гибкой производственной системы (широкими стрелками показаны материальные потоки)

В транспортных системах роботы применяются непосредственно как транспортное средство или только для выполнения погрузо-разгрузочных операций. В последнем случае он управляется устройством управления соответствующей транспортной системы.

В складских автоматизированных системах средства робототехники нашли применение, прежде всего, в виде штабелеров, обслуживающих ячейки стеллажных складов.

Каждый из четырех уровней управления, приведенных в табл. 11.1, реализуется в виде системы микропроцессорных устройств управления, объединенных локальной вычислительной сетью. Поскольку здесь есть верхний уровень с интеллектуальным пультом общего управления всей иерархической структурой, общим способом управления является централизованное четырехуровневое управление с центрами на каждом уровне, подчиненными цен-

трам вышестоящего уровня. Вместе с тем на отдельных уровнях могут применяться и рассмотренные ранее децентрализованные способы управления.

Оперативно-календарный план (ОКП) цеха определяет план выпуска продукции на ближайшее время, включая очередную рабочую смену, поставку на рабочие места необходимого материального обеспечения и ввод в устройства управления оборудования, участвующего в производственном процессе, управляющих программ. Совокупность последних обеспечивает необходимую координацию действий всех частей рассматриваемого производственного комплекса с контролем при этом качества продукции, технического состояния работающего оборудования, с транспортировкой готовой продукции, отходов производства и пр.

Развитие способов и средств управления постоянно стимулирует поиски путей ослабления централизованного начала в управлении производством с тем, чтобы иметь возможность максимально учитывать местные условия при сохранении единой, т. е. централизованной стратегии. Даже в показанной на рис. 11.2 схеме современной системы управления цехом эта тенденция отчетливо прослеживается, особенно если сравнить эту схему с типовыми структурными схемами управления цехами недалекого прошлого. На уровне руководства цеха в ней определенно осталось только оперативно-календарное планирование, диспетчеризация, сбор и хранение сводной информации по отдельным аспектам действий подразделений цеха.

Таблица 11.1. Уровни управления гибкой производственной системы

Уровни управления	Функции	Состав
1. Единица оборудования	Совместное управление приводами. Контроль технического состояния	Устройство управления оборудованием, соединенное с устройством управления ячейки, в которую оно входит
2. Технологическая ячейка	Совместное управление частями ячейки. Контроль качества продукции. Контроль технического состояния (диагностика) ячейки. Обработка сенсорной и другой информации. Ввод-вывод информации на пульт и в локальную вычислительную сеть участка	Устройство управления ячейки. Пульт управления, соединенный с локальной сетью

Таблица 11.1 (окончание)

Уровни управления	Функции	Состав
3. Технологический участок	Совместное управление технологическими ячейками, складскими и транспортными системами участка. Сбор и обработка информации о качестве продукции и техническом состоянии оборудования. Подготовка и хранение программного обеспечения. Ввод-вывод информации на пульт и в локальную вычислительную сеть участка и в сеть цеха	Локальная вычислительная сеть участка. Компьютер с интеллектуальным интерфейсом
4. Цех	Совместное управление технологическим оборудованием цеха. Сбор и обработка информации о качестве продукции и техническом состоянии оборудования. Подготовка и хранение программного обеспечения для подразделений цеха. Оперативно-календарное планирование. Связь с участками и с соседними и вышестоящими подразделениями предприятия	Локальная вычислительная сеть цеха. Компьютер с интеллектуальным интерфейсом

На рис. 11.3 показан вариант дальнейшей децентрализации управления подобными производствами. Все участники производственного процесса в виде технологических модулей (ТМ) и функциональных модулей (ФМ) объединены локальной вычислительной сетью через шину данных. Функциональные модули — это устройства, специализирующиеся на выполнении определенных общесистемных функций, т.е. в совокупности они реализуют функции уровня централизованного управления всем производственным процессом. К ним относятся модули загрузки оборудования, обеспечения инструментом, транспортировки, управляющих программ, подготовки сводной информации, интерфейса оператора и т. д.

Технологические модули, помимо основного технологического оборудования со своим устройством управления, технологических приспособлений и оснаст-

ки, имеют командное устройство (А), называемое администратором (компьютер, управляющий контроллер). Функции администратора — принимать заказы на выполнение очередной операции, запрашивать у соответствующих функциональных модулей необходимое для этого материальное и информационное обеспечение, затем после начала выполнения операции определять через администраторов других технологических модулей, на каком из них следует продолжить обработку изделия по окончании операции на своем модуле. При этом учитывается загрузка модулей и особенности выполняемых на них операций.

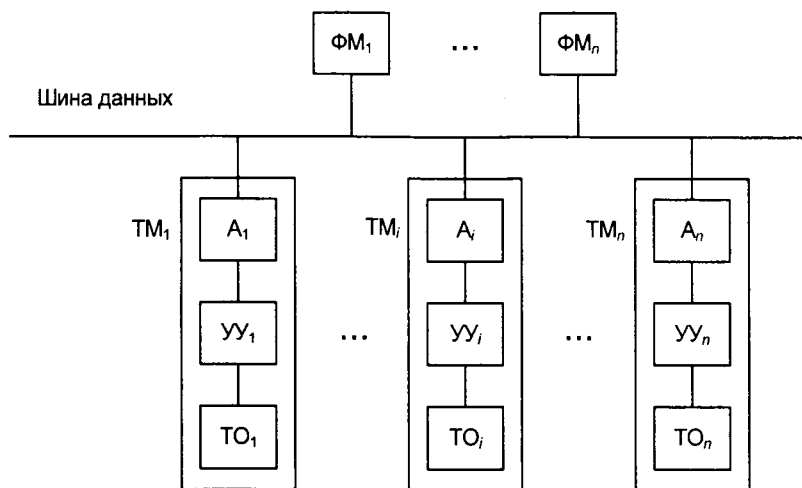


Рис. 11.3. Функциональная схема распределенной гибкой производственной системы

В этой системе управления отсутствует единое планирование и диспетчеризация. Соответственно исключается возможность заблаговременного синтеза и оптимизации планов производства. Последовательность изготовления каждого изделия определяется спонтанно уже в ходе самого производственного процесса. Здесь функциональные модули, реализующие функции центра, скорее обслуживают непосредственных производителей — технологические модули, чем управляют ими. Такая структура отличается высокой надежностью. Сфера ее оптимального с точки зрения экономической эффективности применения — это условия случайного потока заявок на входе.

Перспективным направлением в децентрализации управления производством является также создание виртуальных производств в виде кооперации отдельных производителей, а также поставщиков и сбытовиков, объединенных через общее информационное пространство, например Интернет, общей системой управления и базой данных.

Наиболее сложная задача группового управления прежде всего вследствие ее неопределенности — это управление группой мобильных роботов на местности или в других средах (вода, воздух, космос), особенно в условиях организованного группового противодействия (борьба двух групп). Стратегия и тактика решения таких задач интенсивно исследуются и отрабатываются, в частности, на различных групповых играх роботов (футболистов и т. п.) на компьютерных и физических моделях [16].

В целом возможны следующие варианты задачи такого группового управления:

- ☐ роботы одинаковые и выполняют одинаковые или разные функции;
- ☐ роботы разные и выполняют разные функции;
- ☐ роботы совместно выполняют одну общую задачу или свои различные несвязанные задачи, но могут мешать или помогать друг другу, поэтому требуется координация их действий.

В рамках этих вариантов наряду с применением программного, адаптивного и интеллектуального управлений, используемых, как описано ранее, и в системах управления отдельных роботов, возникают уже названные специфические задачи, связанные со специализацией роботов в группах и их кооперированием.

Ранее были рассмотрены существующие способы группового управления и их различные комбинации. Была показана общая тенденция усиления децентрализации, обусловленная развитием необходимых для этого технических средств и, прежде всего, компьютерных сетей, и их интеллектуализацией. В ходе развития последних возникла, в частности, близкая к рассматриваемой проблеме концепция *мультиагентных систем*, которая открывает новые возможности для создания распределенных систем управления. В ней под агентом понимается интеллектуальный физический или программный объект, реализующий в самом общем случае функциональную триаду "сенсоры-процессор-активатор" и предназначенный для автономного сбора информации, ее обработки, включая принятие решений и планирование действий в соответствии с целями, заложенными в память, обмена информацией с другими агентами и управления определенными процессами в сети.

Программные агенты могут перемещаться по компьютерной сети в соответствии с их целями, например, для сбора информации на местах. Кооперируясь друг с другом для достижения общих целей, они образуют единую мультиагентную систему. Такие системы начинают применяться в компьютерных системах управления роботов с распределенным на их основе интеллектом между его подсистемами и для управления коллективами роботов.

Неоптимальность во многих случаях чисто централизованного управления давно была очевидна, особенно для пространственно разнесенных объектов. Однако и для сосредоточенных объектов эффективность сочетания централизованного и децентрализованного способов управления тоже несомненна и возрастает с усложнением объектов группового управления. Оптимальные структуры управления, сочетающие разные способы управления, определяются конкретными объектами и определенными требованиями к их совместному функционированию. Приведенные ранее соображения определяют только границы и общие возможности, в рамках которых надлежит искать решения.

ГЛАВА 12

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

12.1. Развитие устройств управления роботов

Системы управления роботов и их аппаратное обеспечение развиваются не изолированно от систем управления других типов объектов. Устройства управления первых роботов и их приводы были заимствованы из станкостроения. Поэтому перед рассмотрением эволюции аппаратуры управления роботов остановимся на этапах развития устройств числового программного управления (УЧПУ) станков как предшественников этой аппаратуры.

Станки с ЧПУ появились в 1950-е годы. Это был первый и, как показало будущее, решающий шаг в развитии идеи гибкой автоматизации. Первые системы ЧПУ для станков, созданные в Массачусетском технологическом институте США, программировались обучением и управлялись от ЭВМ с записью управляющих программ на перфоленте и последующей передачей их на станки.

Следующий, второй этап их развития в 1960-е годы — это прямое дистанционное централизованное управление несколькими станками от одной ЭВМ в режиме разделения времени. Управляющие программы при этом записывались уже на магнитных носителях (на магнитной ленте, диске и т. п.). Однако доля станков с ЧПУ была еще очень мала — не более 0,1 %.

Третий этап связан с революционным скачком, который произошел в 1970-е годы с появлением микропроцессоров. На их основе были созданы компьютерные УЧПУ для управления отдельными станками. При этом резко снизилась стоимость УЧПУ — с 50 % от общей стоимости станка до 20 % и менее. Одновременно была резко повышена надежность систем управления, в том числе благодаря переходу от дистанционного по кабелю централизованного управления к децентрализованному автономному управлению.

Четвертый этап развития УЧПУ — это переход к иерархическим системам комбинированного управления, в которых местные компьютерные УЧПУ отдельных станков объединены централизованной системой управления от общей ЭВМ. Функции последней — групповое управление всем производственным комплексом, содержащим эти станки, включая планирование, хранение библиотек управляющих программ, контроль отказов и другие общесистемные функции.

Современная тенденция развития этих систем, что уже отмечалось в предыдущей главе 11, — это развитие распределенных систем ЧПУ путем постепенного уменьшения функций центрального управления с передачей их местным УЧПУ.

Вернемся теперь к аппаратуре управления роботов. У первых роботов устройства управления конструктивно обычно размещались на общем основании робота. Однако в дальнейшем они стали выполняться в виде отдельных шкафов (стоек) или настольной конструкции. Это увеличило эффективно используемую часть рабочей зоны манипуляторов робота, а также повысило безопасность персонала.

Устройства управления роботов вначале создавались свои для каждого конкретного робота. Затем появились унифицированные устройства управления, предназначенные для роботов с определенными типом приводов (пневматических, гидравлических, электрических) и способом управления. Для роботов с простым цикловым управлением были созданы устройства группового управления. На рис. 12.1 показано одно из первых отечественных устройств

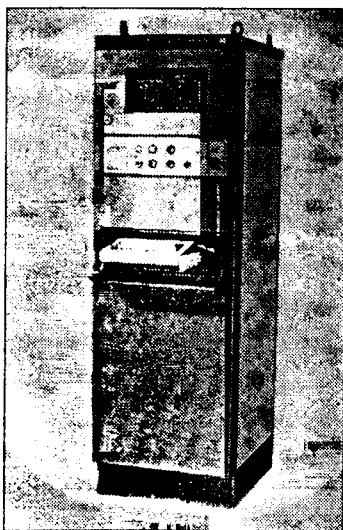


Рис. 12.1. Унифицированное устройство группового циклового программного управления Гранит КМС-2

группового циклового управления, которое имеет 512 управляющих выходов с возможностью организации локальной сети.

Первые отечественные унифицированные устройства дискретного позиционного программного управления типа УПМ были построены как синхронный микропрограммный автомат. Основным программным носителем был кассетный накопитель на магнитной ленте. Программирование осуществлялось методом обучения с помощью выносного пульта и с записью в блоке оперативной памяти. Устройство было ориентировано на датчики положения типа синусно-косинусных вращающихся трансформаторов и фотоэлектрические кодовые датчики.

В первых устройствах непрерывного (контурного) управления программирование осуществлялось методом обучения путем перемещения рукой оператора рабочего органа манипулятора с синхронной записью управляющих программ для приводов на кассетном накопителе на магнитной ленте, с которого они и считывались затем в режиме воспроизведения.

На рис. 12.2 показана одна из модификаций такого отечественного устройства типа УКМ. Эти унифицированные устройства были построены на базе микроЭВМ. Внешний вид аналогичных устройств управления иностранных фирм показан на рис. 8.1.

Опыт применения первых серийных устройств управления промышленных роботов и быстрое расширение областей применения роботов привели к постепенному формированию следующих тенденций в развитии этих устройств:

- ☐ унификация на уровне основных компонентов вплоть до модульного построения как аппаратного, так и программного обеспечения систем управления;
- ☐ развитие принципов параллельной обработки информации;
- ☐ децентрализация управления с переходом к распределенным системам управления.

Принцип модульного построения роботов и их аппаратуры управления будет рассмотрен в *главе 13 (параграф 13.3)*. Здесь отметим только, что он заключается в функциональной и конструктивной унификации компонентов систем, что позволяет собирать различного типа устройства управления из единого набора модулей без каких-либо доработок. Это не только предельно упрощает создание новых устройств управления и сокращает сроки освоения их производством, но одновременно существенно снижает их стоимость, повышает надежность, упрощает техническое обслуживание.

Перечисленные перспективы развития устройств управления получили развитие и реализацию после появления микропроцессоров в качестве их основ-

ного унифицированного компонента. На их основе началось быстрое развитие децентрализованных и распределенных систем управления.

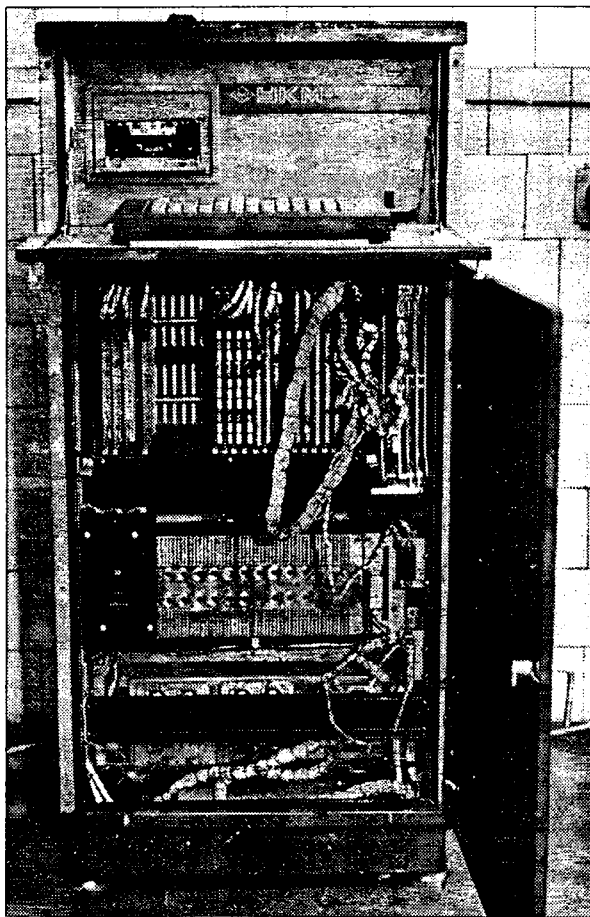


Рис. 12.2. Унифицированное устройство непрерывного (контурного) программного управления УКМ-7728

12.2. Современные устройства управления средств робототехники и тенденции их развития

Типовая схема современного микропроцессорного устройства программного управления роботом состоит из нескольких микропроцессоров, каждый из которых управляет одним или несколькими приводами, и центрального мик-

ропроцессора на втором уровне управления, осуществляющего совместное управление ими. Последний может быть заменен персональным компьютером соответствующего исполнения. На нижнем уровне управления отдельными приводами управление может быть аналоговым, импульсным или цифровым. Типовой усилитель мощности — это ШИМ, обеспечивающий наибольшее КПД и быстродействие.

Одна из тенденций развития таких структур управления связана именно с совершенствованием решения задач совместного группового управления приводами.

К этим задачам относится вычисление $q_3(t)$ по $x_{p3}(t)$. При достаточно сложной кинематике манипулятора для решения этой задачи даже на основе обратной задачи кинематики может оказаться недостаточно одного микропроцессора. Тем более это относится к быстродействующим манипуляторам с непрерывным управлением, для которых требуется решать обратную задачу не кинематики, а динамики. Отсюда возникает необходимость использования на втором уровне управления многопроцессорных структур с распараллеливанием решения этой задачи. Среднее число микропроцессоров при этом, которое, естественно, зависит от их вычислительной мощности, составляет 3—4.

Другая задача второго уровня управления — общесистемная динамическая коррекция в виде последовательной коррекции типа компенсатора, перекрестных связей, компенсирующих взаимовлияние приводов, и компенсации изменений полезной нагрузки на рабочем органе манипулятора. Решение этой задачи также требует соответствующих вычислительных мощностей и, следовательно, дополнительных микропроцессоров.

В устройствах управления очувствленных роботов реализация описанных в главе 9 уровней управления (см. рис. 9.3 и 9.6), включая обработку сенсорной информации и выполнение других функций адаптивного и интеллектуального управления, осуществляется отдельными микропроцессорами. Выбор числа микропроцессоров для этих уровней и синтез алгоритмов их совместной работы выполняется, прежде всего, исходя из требования функционирования системы в реальном масштабе времени. Развитие самой микропроцессорной базы этих систем идет, во-первых, по пути увеличения разрядности от 8 к 16, 32 и далее и, во-вторых, по пути увеличения емкости встроенной постоянной памяти от 8—32 Кбайт к 128 Кбайт, 1 Мбайт и более.

Опыт развития и все более широкого применения унифицированных устройств управления, основанных на серийных микропроцессорах общепромышленного применения, естественным образом породил следующий этап развития устройств управления роботов, основанный на создании специальных микропроцессорных функциональных модулей. С их помощью стало возможным не только собирать традиционные типы устройств управления

для отдельных роботов (при чем уже не унифицированные, а соответствующие без избыточности индивидуальным особенностям каждого робота), но и создавать из таких модулей, объединенных локальными сетями, распределенные системы группового управления роботов и целых технологических комплексов. Преимущества такого решения были рассмотрены ранее.

В настоящее время этот принцип построения распределенных систем управления из модулей, объединенных локальными сетями, реализован многими ведущими в области создания систем управления роботов и робототехнических систем фирмами. Наборы таких модулей предлагают, например, фирмы: "Сименс" (ФРГ), "Фанук" (Япония), "Оливетти" (Италия).

В число типовых модулей входят контроллеры обработки сигналов сенсоров, сетевые контроллеры для подключения к локальной сети, интерфейсы для связи с оператором и другими системами, а также силовые преобразователи и источники питания. К ним предлагаются локальные сети различного уровня. Принципы построения подобных распределенных модульных систем управления крупных технологических комплексов были рассмотрены в *главе 11*.

Программное обеспечение (системное, прикладное и инструментальное) рассмотренных систем управления является иерархическим, как и структура самой системы управления (см., например, рис. 9.1), и модульным, в соответствии с ее аппаратной реализацией. Его основой является иерархия языков, включающая в общем случае языки следующих уровней:

- ☐ языки общения человека-оператора с роботом через интеллектуальный интерфейс;
- ☐ проблемно-ориентированные языки для описания выполняемых технологических операций в координатах рабочей зоны робота (Autopass, LM-GED, Robex и др.);
- ☐ роботоориентированные языки для описания движений самого робота (WAVE, VAL, HELP, TEACH и др.);
- ☐ языки элементарных движений (SIGLA, RCL, RPL, ANORAD);
- ☐ языки управления отдельными приводами.

В системах управления роботов, входящих в технологические комплексы, в эту иерархию могут также входить промежуточные языки, предназначенные для связывания систем, использующих различные языковые средства.

Одна из актуальных задач развития программного обеспечения — это повышение общности языка верхнего уровня, т. е. языка пользователя, до уровня профессионального языка технолога или другого специалиста, эксплуатирующего робототехнические системы, с тем, чтобы от них не требовалось специальных знаний по программированию таких систем. Пределом в этом

направлении будет, очевидно, возможность общаться с робототехническими системами на естественном человеческом языке.

Важным этапом в развитии распределенного управления на базе специализированных модулей, объединенных в локальную сеть, стало появление транспьютеров — программируемых преобразователей дискретной информации с развитыми средствами связи. Из таких соединенных в сеть элементов собираются системы управления в виде распределенных, параллельно работающих специализированных функциональных модулей.

Семейство транспьютеров постоянно пополняется новыми изделиями все большей разрядности, с большими объемом памяти, скоростью обмена информацией и числом портов. Выпускаются транспьютеры и транспьютероподобные элементы фирмами INMOS, Intel, Motorola и др.

Однако возможности распараллеливания обработки информации в транспьютерных системах имеют свой предел. Он определяется тем, что с увеличением числа параллельно функционирующих транспьютеров происходит, с одной стороны, снижение их загрузки, а с другой — рост загрузки соединяющих их каналов связи. Такое ограничение имеет место в любых многопроцессорных распределенных системах, когда дальнейшее увеличение количества микропроцессоров не дает существенного увеличения вычислительной мощности. Причем этот предел далеко (на порядки) не соответствует перспективным потребностям интеллектуальных систем управления роботов по перечисленным в *параграфе 9.3* функциям этих систем, начиная с обработки сенсорной информации и кончая интерфейсом между человеком-оператором и роботом.

Кардинальным решением является переход к принципиально новому аппаратному обеспечению в виде *нейронных структур*. Уже первый опыт их применения позволил существенно превзойти быстродействие современных распределенных систем управления, в частности, в обработке сенсорной информации и планировании поведения. Создание подобных однородных структур и необходимой для них элементной базы является одним из важнейших направлений развития искусственного интеллекта в целом. Поэтому научные исследования в этой области интенсивно ведутся во всем мире.

В заключение остановимся на аппаратуре управления роботами от человека-оператора. В устройствах управления роботов обычно предусмотрены встроенные или небольшие переносные пульты, предназначенные в основном для целей программирования методом обучения. Для управления от человека-оператора с помощью задающих рукояток и в режиме супервизорного управления применяются специальные пульты — напольные, настольные, а для мобильных роботов — носимые. На рис. 12.3 показан пульт оператора мобильных роботов, подобных показанным в *параграфе 3.4*.

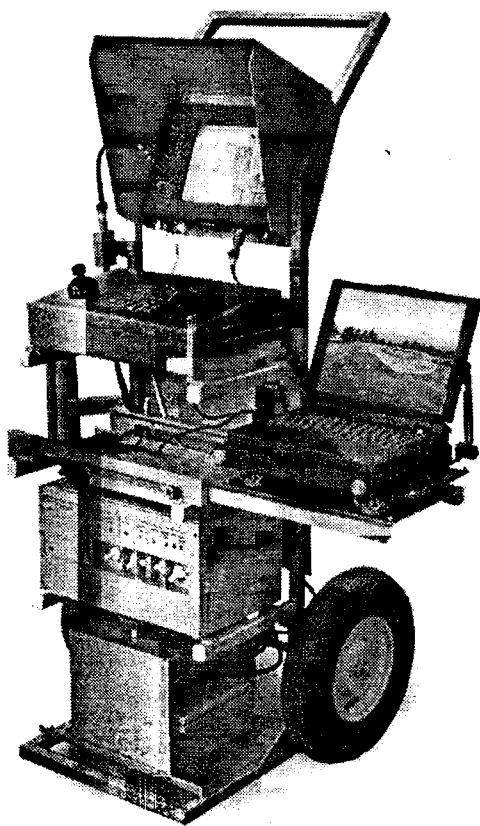


Рис. 12.3. Пульт оператора мобильных роботов (ЦНИИ РТК, Россия)

ГЛАВА 13

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ

13.1. Особенности проектирования средств робототехники

Проектирование технических систем — это процесс создания нового изделия в виде его проекта. Проект — это совокупность технических документов, по которым изделие изготавливается и эксплуатируется. Процесс проектирования стандартизирован и состоит из следующих этапов:

- ☐ разработка технического задания;
- ☐ предварительное проектирование (разработка технического предложения);
- ☐ эскизный проект;
- ☐ технический проект (разработка полного комплекта технической документации на изделие).

Первые два этапа относятся к научно-исследовательским работам (НИР), а остальные — к опытно-конструкторским (ОКР). Процесс проектирования изделия не заканчивается техническим проектом, а продолжается в течение всего времени производства и эксплуатации изделия — всего его "жизненного цикла". В течение этого времени изделие окончательно "доводится", повышается его технический уровень путем корректировки технической документации [19].

Порядок и методы проектирования средств робототехники регламентируются комплексом нормативно-технических документов, которые включают ГОСТы (по классификации, терминологии и обозначениям, основным параметрам) и методические указания (по техническим требованиям, методам испытаний и правилам приемки, по оценке экономической эффективности). Аналогичные документы имеются и по основным компонентам роботов — устройствам управления, приводам, захватным устройствам, околороботной оснастке.

На первом этапе проектирования робота при разработке технического задания, прежде всего, необходимо в рамках определения технических требований к нему и последующего анализа путей их реализации исследовать взаимодействие робота с другим работающим совместно технологическим оборудованием и с объектами манипулирования. Цель исследования — выявление возможностей, позволяющих за счет достаточно несущественных их изменений облегчить требования к роботу и тем самым получить общую технико-экономическую выгоду для всей системы совместно работающих машин. Наибольший технико-экономический эффект при этом может быть достигнут, когда все оборудование проектируется одновременно с роботом. Чаще всего это имеет место при проектировании роботов, выполняющих основные технологические операции.

Одновременно с той же целью необходимо исследовать возможности создания так называемой околороботной оснастки и других средств упорядочения и упрощения внешней среды робота (устройств подачи и позиционирования объектов манипулирования, их маркировка и т. п.). На рис. 13.1 приведена качественная зависимость стоимости собственно робота и стоимости его вместе с такими средствами в функции от степени упорядочения внешней среды. Как следует из этих графиков, существует некоторая оптимальная для каждой конкретной задачи степень упорядочения внешней среды, при которой достигается минимальная суммарная стоимость робота и околороботной оснастки.

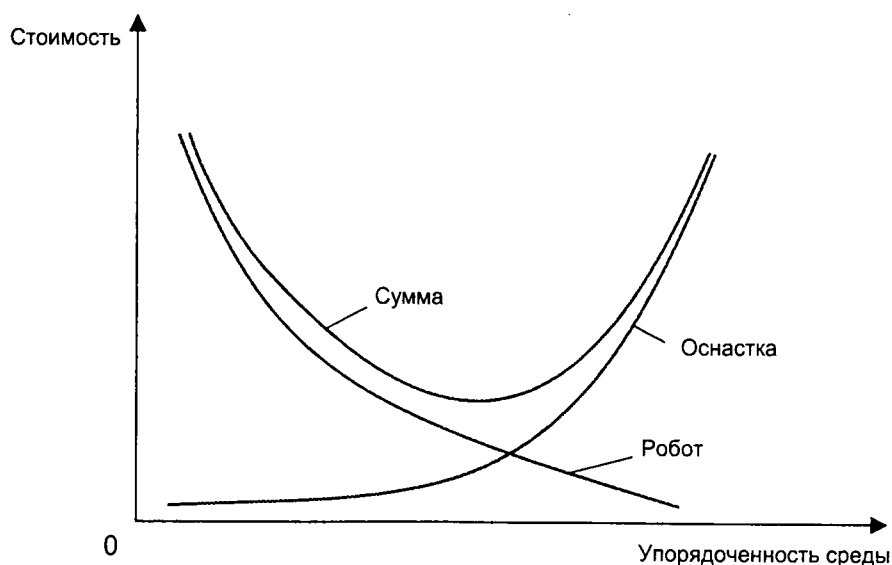


Рис. 13.1. Стоимость робота и околороботной оснастки

Только после такого рассмотрения взаимодействия робота с внешней средой и оптимизации технических требований к роботу и объектам этой среды следует переходить к проектированию собственно робота. Основной принцип здесь, как и при проектировании других технических систем, — *декомпозиция*, т. е. разбиение всей задачи на несколько решаемых параллельно более простых подзадач. В соответствии с этим на первом этапе проектирования после составления функциональной схемы робота должно быть проведено его разделение на три части — механическую систему, аппаратуру управления и программное обеспечение, проектирование которых требует специалистов разного профиля. В основе решения этой задачи лежит разделение функций робота и технических требований к нему между этими тремя взаимосвязанными частями. Задача неоднозначна и наиболее ответственна, поскольку ее решение в значительной степени предопределяет результат всей дальнейшей работы по созданию робота.

При указанном распределении функций робота выделяют прежде всего функции, которые полностью или в основном определяются одной из этих трех частей и соответственно приписываются им. Например, грузоподъемность и геометрия рабочей зоны определяются механической системой, параметры энергопитания и диапазон температуры внешней среды существенны в основном для аппаратуры управления, языки программирования имеют значение только для программного обеспечения.

Остальные функции необходимо оптимально распределить между частями робота на основании определенных выбранных критериев. Взаимовлияние между некоторыми из этих функций дополнительно усложняет задачу и может привести к тому, что локальное улучшение характеристик одной из частей робота ухудшит эффективность робота в целом. Например, известная взаимосвязь точности и быстродействия не позволяет независимо распределять требования к каждому из этих параметров между частями робота.

Принцип декомпозиции, конечно, существенно облегчает процесс проектирования, но одновременно он ограничивает технический уровень создаваемой техники, поскольку игнорирует взаимодействия независимо проектируемых частей системы. Оптимальный подход к проектированию требует *системного подхода* к роботу как к единому целому. Ранее уже говорилось о таком подходе и в связи с необходимостью рассмотрения робота совместно с объектами внешней среды.

При проектировании первых роботов сначала создавались их исполнительные устройства, а затем для них как заданных объектов управления проектировались устройства управления. Однако в дальнейшем по мере совершенствования роботов и стремления к достижению более высоких параметров исполнительные устройства и устройства управления стали проектироваться

совместно как единая система на основе общих критериев. Это позволило обеспечить оптимальное распределение технических требований к роботу между этими его частями. Характерный пример — задача минимизации массы манипуляторов. Переход от традиционного расчета механической части на жесткость с ограничением упругих деформаций звеньев к расчету только на прочность со снятием этих ограничений позволяет примерно втрое уменьшить массу механической системы манипуляторов. Однако возникающая при этом гибкость конструкции и вызванная ею колебательность существенно осложняют задачу управления движением таких манипуляторов и соответственно технические требования к устройству управления.

При таком системном подходе к проектированию роботов можно сформулировать следующие общие принципы их создания:

1. Децентрализация управления вплоть до конструктивного встраивания устройств управления отдельными частями механической системы в эти части. Это позволяет повысить надежность и быстродействие системы управления в целом за счет сокращения связей, распараллеливания и иерархического ее построения.
2. Необходимость обеспечения значительно большей надежности управления, чем обычно считается приемлемым для подобных типов объектов. Это вызвано тем, что в этих системах отказ управления, как правило, ведет к аварии всей системы.
3. Широкое применение компьютерного моделирования, без чего такие сложные системы, как правило, не могут быть созданы на современном научно-техническом уровне.

13.2. Методы проектирования средств робототехники

В основе методов проектирования техники лежит унификация. Проектирование нового изделия — это всегда противоречивая задача для разработчика: с одной стороны, существует естественное стремление использовать все последние достижения науки и техники в данной области, с другой, — этому препятствуют ограничения по срокам, стоимости, материальным ресурсам и др., которые обычно оговариваются в технических требованиях к создаваемому изделию. Выход здесь один — компромисс в виде оптимальной преемственности с ранее созданными подобными изделиями и их компонентами. Основным средством для этого и служит, как известно, унификация и стандартизация. Иногда в техническом задании прямо оговаривается степень (процент) унификации.

Проблема унификации для робототехники имеет большое значение. Сфера применения роботов быстро расширяется, охватывая все новые области человеческой деятельности. Соответственно быстро растет их номенклатура. Уже сегодня количество требуемых типов роботов только общепромышленного применения измеряется сотнями. В связи с этим одной из важнейших задач робототехники является комплексная унификация роботов и их компонентов.

По определению международной организации по стандартизации, *стандартизация* — это установление и применение правил упорядочения деятельности в определенной области. (Сюда, в частности, входит установление единиц величин, терминов и обозначений, требований к продукции, технологическим процессам, технике безопасности.) К нормативно-техническим документам (НТД) по стандартизации, прежде всего, относятся стандарты, методические указания и технические условия.

Унификация — это наиболее эффективный метод стандартизации, заключающийся в рациональном сокращении числа изделий одинакового назначения с целью повышения экономичности производства и эксплуатации, повышения качества.

В робототехнике унификация развивается по трем уровням: для компонентов роботов, для собственно роботов и для технологических комплексов с роботами. Отработанные и серийно выпускаемые унифицированные компоненты — по существу, единственно возможная основа развития робототехники в условиях упомянутого неограниченного роста номенклатуры роботов и необходимости оперативно создавать, осваивать в производстве и эксплуатации новые типы роботов и их модификаций.

Создание унифицированных функциональных компонентов роботов (приводов, устройств управления и т. д.) явилось первым этапом унификации в области робототехники. Следующим этапом стала унификация этих компонентов на основе *модульного принципа построения* [17]. Сущность этого принципа заключается в построении механических, аппаратных и программных частей робота из унифицированных частей — *модулей*. Модули унифицированы по функциональному назначению и условиям сопряжения друг с другом (по конструкции, входным и выходным параметрам и т. д.). Система модулей строится по иерархическому принципу: сложные модули состоят из более простых. Например, привод, выполненный в виде модуля, является готовой конструктивной частью для сборки манипуляторов и устройств передвижения, приспособленной для соединения с модулями другого функционального назначения. При этом в свою очередь он тоже состоит из более мелких модулей, которые позволяют собирать различные модификации этого типа привода.

Модульный принцип построения роботов позволяет наиболее легко создавать их модификации и новые типы на базе одних и тех же конструктивных частей. При этом возникает возможность в каждом конкретном случае выбирать

оптимальную степень кинематической, аппаратной и программной избыточности, стоимость и распределение функций между роботом и работающим вместе с ним технологическим оборудованием (вплоть до конструктивного объединения отдельных модулей робота с этим оборудованием).

В связи с рассматриваемым модульным принципом построения роботов возникает вопрос: существует ли альтернатива этому принципу сегодня или в перспективе? Таким принципом может представляться идея создания универсальных оцувствленных роботов. Собственно говоря, именно эта идея наиболее соответствует исходной идее робота как универсального заменителя человека. Техническая база для создания систем управления таких роботов уже имеется — это микропроцессоры, которые сами по себе представляют яркий пример реализации идеи универсального программно перестраиваемого устройства широкого применения. Однако, в отличие от микроэлектроники, в робототехнике в целом этот путь, по крайней мере сегодня, экономически невыгоден, поскольку стоимость роботов резко возрастает при увеличении их функциональных возможностей и грузоподъемности. Вместе с тем сейчас отчетливо прослеживается тенденция перехода ко все более функционально сложным роботам с техническим зрением и искусственным интеллектом. Идею модульного построения таких роботов можно трактовать как экономически оптимальный путь создания функциональной избыточности, но не в отдельном роботе, а в рамках всего арсенала унифицированных его частей — модулей. Таким образом, модульный принцип построения роботов является не альтернативой сверхуниверсальным роботам, а, наоборот, формой реализации этой идеи, но применительно не к отдельному роботу, а ко всему их множеству.

В целом модульный подход к построению роботов дает следующие преимущества:

- ☐ резко сокращаются (до нескольких месяцев) сроки создания и освоения производства новых марок роботов, поскольку они собираются из отработанных серийных компонентов;
- ☐ возрастает технический уровень роботов и снижается их стоимость, что связано с удешевлением компонентов роботов при их серийном производстве, а также с уменьшением избыточности в конструкции и параметрах роботов благодаря тому, что появляется возможность для каждого конкретного применения компоновать роботы из минимально необходимого числа простейших модулей;
- ☐ снижаются расходы на создание, производство и эксплуатацию роботов, существенно упрощается их обслуживание и ремонт;
- ☐ производство роботов сводится главным образом к их сборке из стандартных частей, что может быть организовано практически на любом машиностроительном производстве.

Особенно большое значение для повышения технического уровня и эффективности применения роботов имеют модульные устройства управления. С их помощью можно решать проблемы управления не только самими роботами, но и целыми технологическими комплексами (участками, цехами) в целом. Это позволяет резко ускорить и удешевить создание и внедрение роботов в составе технологических комплексов.

Идея модульного построения роботов впервые была сформулирована, обоснована и реализована в ЦНИИ РТК в 1980—82 гг. Здесь была создана первая система модулей для построения механической части роботов, их устройств управления и программного обеспечения [1]. Высокая эффективность применения этих модулей была апробирована при создании роботов для работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Только модульный подход позволил за 2—3 месяца разработать и поставить на станцию более 15 роботов различного назначения, собранных из ранее отработанных унифицированных модулей.

В настоящее время модульный принцип построения роботов успешно используется большинством ведущих фирм, производящих роботов, в том числе Юнимейшен и Праб (США), Мицубиси и Фанук (Япония), Фольксваген и Бош (Германия), Сиаки (Франция), Оливетти (Италия), Электролюкс (Швеция), АВВ (Швейцария).

Модульный принцип построения техники нашел применение и в ряде других отраслей промышленности — в судостроении, строительстве, приборостроении. Наряду с ним существуют и другие принципы построения техники, тоже основанные на идее унификации, — это принципы *базового изделия* и *агрегатного построения*. Первый принцип заключается в создании гаммы (семейства) изделий, повторяющих конструкцию первоначально отработанного базового изделия, но в других габаритах и другой грузоподъемности. Принцип агрегатного построения заключается в создании различного назначения и компоновок изделий из унифицированных сборочных функциональных единиц — агрегатов (агрегатные станки, агрегатные системы в приборостроении и вычислительной технике.) Эти оба принципа построения технических систем нашли применение и в робототехнике и могут рассматриваться как частные случаи модульного принципа.

На этих принципах, в частности, создаются серийно выпускаемые специальные роботы — сборочные, сварочные — для нанесения покрытий и т. п. Однако и при проектировании таких роботов модульный принцип может оказаться полезным для предварительного физического моделирования будущего изделия, подлежащего в последующем системной оптимизации.

Модульный принцип также постепенно заменяется таким системным подходом по мере развития миниатюризации в робототехнике, поскольку разделение на конструктивно отдельные модули естественно означает некоторую массогабаритную избыточность.

ГЛАВА 14

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

14.1. Классификация технологических комплексов с применением роботов

Задача робототехники наряду с созданием собственно средств робототехники заключается и в создании технических систем и комплексов, основанных на использовании этих средств. Как было отмечено в главе 1 при изложении истории развития робототехники, несмотря на непрерывное расширение сферы применения роботов основной областью их применения по-прежнему остается промышленность, прежде всего машиностроение и приборостроение. Здесь появились первые роботы и сосредоточено до 80 % всего мирового парка роботов, нашедших применение прежде всего в заготовительном и механообрабатывающем производстве. Напомним, что роботы, применяемые в промышленности, получили наименование промышленных роботов (ПР). Они подразделяются на технологические, которые выполняют основные технологические операции, и вспомогательные, занятые на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования. Технологические комплексы с такими роботами называются роботизированными технологическими комплексами (РТК). Термин "робототехнические системы" (РТС) означает технические системы любого назначения, в которых основные функции выполняют роботы.

Начнем рассмотрение применений средств робототехники в промышленности с классификации технологических комплексов.

В табл. 14.1 представлена классификация технологических комплексов применительно к машиностроению. Воспользуемся ею для рассмотрения применения в этих комплексах роботов.

Таблица 14.1. Классификационные признаки и соответствующие им основные типы технологических комплексов с роботами

№ п/п	Признак	Наименование
1.	Тип подразделения	Технологическая ячейка Участок Линия Цех
2.	Степень изменения производства, связанная с применением ПР	Для вновь создаваемого производства: с принципиально новой технологией; с новым технологическим оборудованием. Для модернизируемого производства: с изменением технологии; с модернизацией оборудования
3.	Вид технологического процесса	Механообработка Холодная штамповка Ковка Литье Прессование пластмасс Термическая обработка Сварка Транспорт Контроль и испытания и т. д.
4.	Тип выполняемых роботами технологических операций	Выполняемые роботами технологические операции: основные; вспомогательные
5.	Серийность и номенклатура продукции	С определенным размером партии выпускаемой продукции без переналадки комплекса. С определенным перечнем номенклатуры выпускаемой продукции
6.	Компоновка комплекса	Линейная Круговая Линейно-круговая По площади Объемная

Таблица 14.1 (окончание)

№ п/п	Признак	Наименование
7.	Тип управления	Централизованное Децентрализованное Комбинированное
8.	Участие человека	В выполнении технологических операций основных вспомогательных В управлении комплексом

Тип производственного подразделения. Здесь классификационным признаком служит количество выполняемых технологических операций. Простейшим типом такого подразделения является *технологическая ячейка* (ТЯ). В ней выполняется всего одна основная технологическая операция (помимо вспомогательных). При этом количество единиц технологического оборудования и ПР в составе ТЯ не регламентируется. В частности, в ТЯ может совсем отсутствовать технологическое оборудование помимо ПР, когда основную операцию выполняет ПР, или, наоборот, могут отсутствовать самостоятельные ПР, когда последние объединены с основным технологическим оборудованием.

Следующим более крупным типом является *технологический участок* (ТУ). На нем выполняется несколько технологических операций. Эти операции могут быть одинаковыми или различными. Если различные операции технологически последовательно связаны, то такой участок представляет собой *технологическую линию* (ТЛ).

Технологический участок обычно состоит из ТЯ, но может и не иметь их. Например, участок может включать несколько единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним ПР (неподвижным с размещением оборудования вокруг ПР или мобильным, перемещающимся вдоль ряда единиц оборудования).

Следующим типом комплекса является *цех*, состоящий из нескольких участков. Пределом развития роботизированного производства является комплексно роботизированное предприятие.

В состав участков и цехов помимо технологических ячеек обычно входят еще склады, транспорт (в том числе и на базе ПР) и системы контроля качества продукции.

Классификация технологических комплексов по степени изменения производства, связанного с применением ПР. Такое изменение, очевидно, будет максимальным для создаваемых новых производств, основанных на новых технологиях, и минимальным для действующего производства, автоматизируемого на базе серийных ПР.

Классификация по виду технологического процесса. Она не исчерпывается приведенным в табл. 14.1 перечнем типовых для современного состояния областей применения ПР в машиностроении.

Классификация по типу выполняемых роботами технологических операций. Здесь определены два уже названных ранее основных варианта: ПР выполняют основные технологические операции (сборку, сварку, окраску и т. д.) или вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования.

Серийность и номенклатура продукции. Серийность определяется объемом партий продукции, которые могут изготавливаться без переналадки комплекса, а номенклатура — шириной перечня выпускаемых видов продукции. Оба эти показателя имеют существенное влияние на эффективность применения ПР. В частности, каждый технологический комплекс характеризуется предельными значениями этих параметров, вне рамок которых он оказывается экономически невыгодным вплоть до целесообразности перехода от гибких комплексов к специальным автоматам (при большой серийной и узкой номенклатуре) или даже к использованию рабочих вместо ПР (в противоположном предельном случае единичного производства).

Классификация по типу компоновки комплекса. Приведены основные типы таких компоновок. При простой линейной компоновке оборудование располагается в один ряд (по линии), а при наиболее сложной объемной компоновке — на нескольких этажах (уровнях).

Классификация по типу управления. Она включает рассмотренные ранее централизованный, децентрализованный и комбинированный способы управления. Централизованное управление осуществляется устройством группового управления, а децентрализованное реализуется с помощью местных устройств управления, связанных друг с другом сетью для координации.

Классификация по степени участия человека. Указаны два варианта участия человека: когда человек непосредственно выполняет некоторые технологические операции (основные или вспомогательные) и когда он участвует в управлении комплексом.

14.2. Компоновки технологических комплексов с роботами

В предыдущем параграфе 14.1 была дана общая классификация технологических комплексов, в которых могут быть применены роботы. Как там отмечено, в отличие от простейших комплексов в виде технологической ячейки, участкам, линиям и цехам присущи принципиально новые качества. Это, прежде всего, необходимость наличия транспортно-складской системы и единой системы управления. Эти системы материально и информационно связывают отдельные технологические ячейки, автоматизированные склады (материалов, заготовок, инструмента, отходов производства, готовой продукции) и другие части комплекса в одну согласованно действующую систему. Кроме того, такие комплексы должны включать помимо систем управления в реальном времени непосредственно технологическим оборудованием расположенные над ними уровни иерархии управления, решающие задачи программирования и оперативно-календарного планирования (сменного, суточного, недельного и т. д.).

На рис. 14.1 показан пример простой линейной компоновки однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с непосредственной связью между составляющими линию ячейками. В ней отсутствует межоперационная транспортная система, а предметы производства передаются от одной ячейки к другой непосредственно входящими в них вспомо-

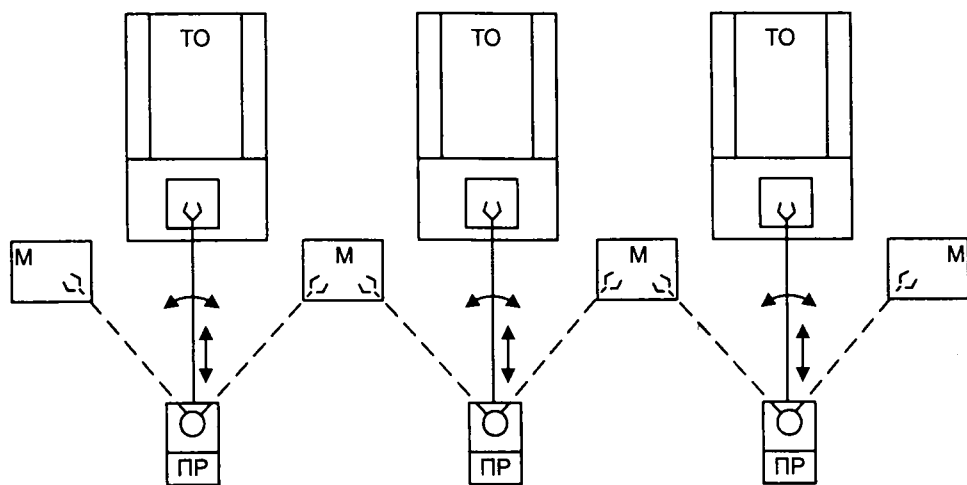


Рис. 14.1. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой: ТО — основное технологическое оборудование; ПР — промышленный робот; М — магазин поштучной выдачи заготовок

гательными ПР. Такие линии с непосредственной жесткой связью между ячейками просты, однако требуют строго определенного взаимного расположения основного технологического оборудования.

На рис. 14.2 показан более сложный вариант линейной компоновки однопочной роботизированной технологической линии тоже холодной штамповки, в которой транспортные связи между составляющими ее ячейками осуществляются с помощью специальных транспортных устройств. Это дает возможность территориально развязать отдельные ячейки и тем самым облегчить компоновку всего комплекса. В качестве транспортного устройства могут быть использованы транспортер, мобильные ПР.

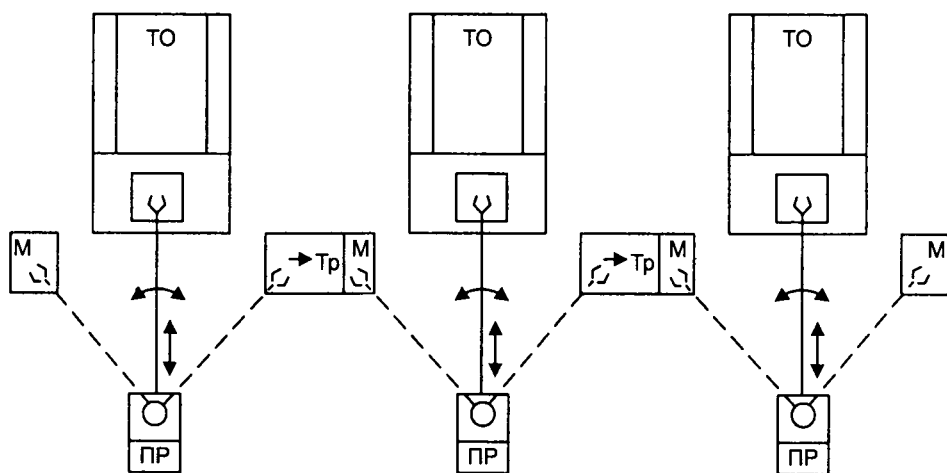


Рис. 14.2. Схема однопочной роботизированной технологической линии холодной штамповки с транспортным устройством: Тр — транспортное устройство

Показанные на рис. 14.1 и 14.2 компоновки характерны для технологических процессов с малым циклом обработки предметов производства на технологическом оборудовании (единицы, десятки секунд), что свойственно, в частности, процессам холодно-листовой штамповки. Для технологических процессов с большей длительностью обработки на технологическом оборудовании часто применяют другой тип построения комплексов с обслуживанием одним ПР нескольких единиц технологического оборудования. На рис. 14.3 показан вариант такого комплекса с круговой компоновкой, в котором один ПР обслуживает три металлорежущих станка, расположенных вокруг него. Другая типовая компоновка линии механообработки с применением подвижного ПР, который может быть напольным или подвесным (перемещающимся, например, по монорельсу), приведена на рис. 14.4.

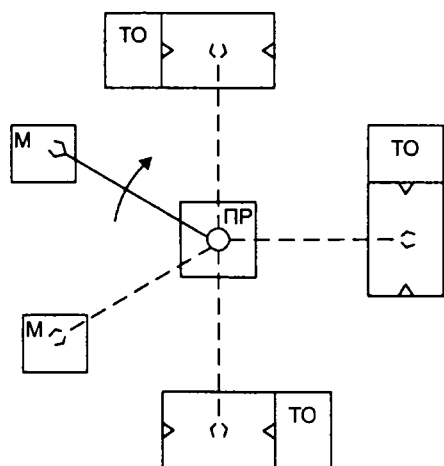


Рис. 14.3. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с круговой компоновкой

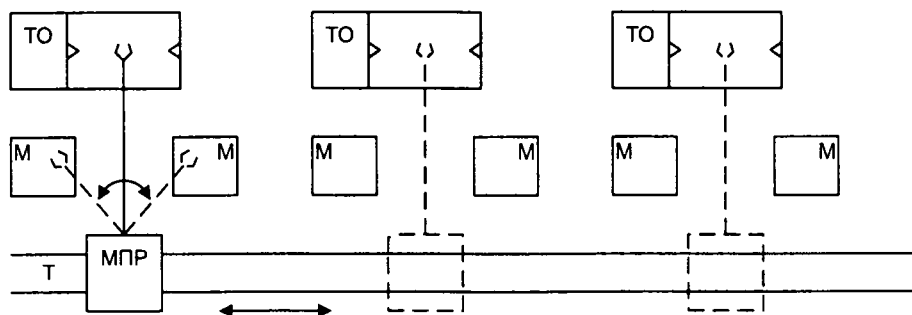


Рис. 14.4. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с линейной компоновкой, обслуживаемого мобильным промышленным роботом: МПР — мобильный промышленный робот; Т — трасса промышленного робота

На рис. 14.5 показан пример более сложного роботизированного технологического комплекса для цеха механообработки с линейно-круговой компоновкой. По схеме можно проследить последовательность движения предметов производства.

В приведенных примерах ПР выполняют вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования. На рис. 14.6 показана схема сборочной линии с линейной компоновкой, на которой основные операции выполняют ПР. Транспортное устройство реализовано в виде шагового конвейера, по которому от одного рабочего места к другому перемещаются кассеты с объектами сборки.

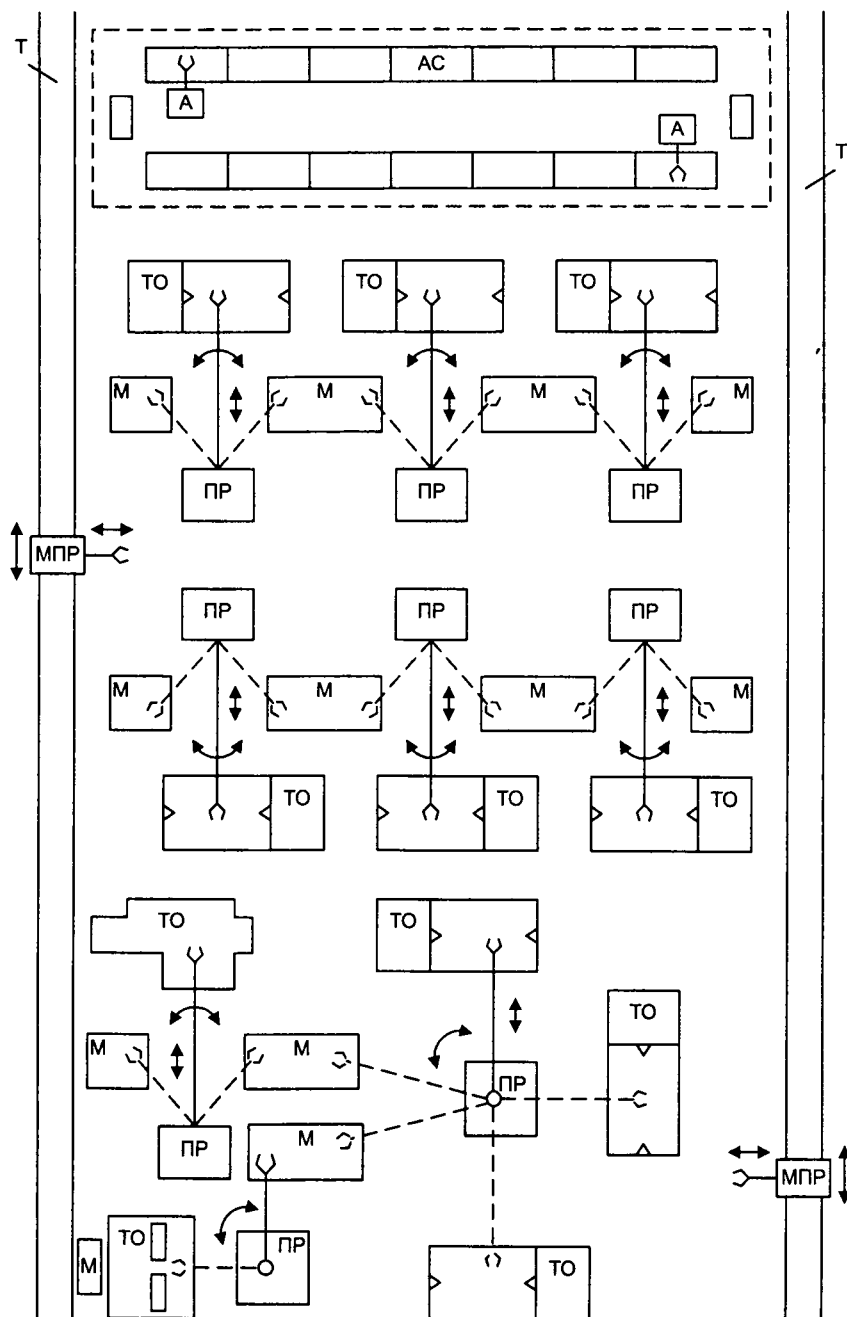


Рис. 14.5. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с компоновкой по площади: АС — автоматизированный склад с подвижными автооператорами-штабелерами А; Т — трасса транспортной системы с мобильными промышленными роботами МПР

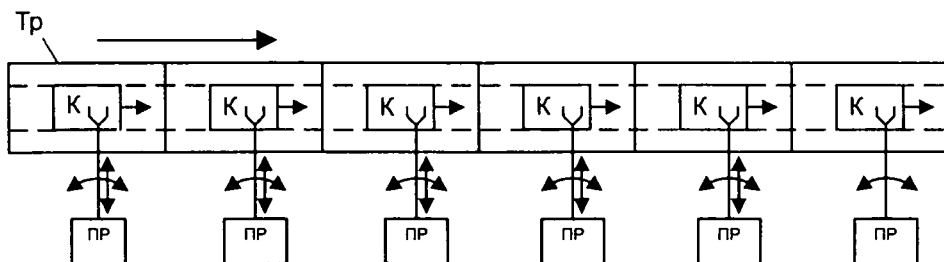


Рис. 14.6. Схема сборочной робототехнической линии с линейной компоновкой:
Тр — шаговый транспортер; К — кассеты

На рис. 14.7 представлена схема сборочного цеха, составленного из типовых сборочных линий, показанных на рис. 14.6.

На рис. 14.8 изображен типовой робототехнический сборочный участок с круговой компоновкой, характерной для приборостроительной промышленности. Схема дана упрощенно, на ней, в частности, не показаны контрольные операции, обязательные в сборочном производстве.

14.3. Управление технологическими комплексами

Все части технологических комплексов объединены общей системой управления. Эта система является иерархической и включает в общем случае следующие три уровня управления. Первый уровень образуют системы управления отдельными технологическими ячейками и другим работающим в составе комплекса оборудованием. На этом уровне применяются устройства управления типа УЧПУ.

Второй уровень управления — это уровень координации отдельных частей комплекса, включая транспортные системы, в согласованно работающую систему. Реализуется этот уровень обычно на стандартных микроЭВМ. На этом уровне осуществляются также контроль технологических режимов и исправности оборудования, синтез управляющих программ для первого уровня, обработка и передача информации между управляемыми на этом уровне частями комплекса и к следующему, третьему уровню управления.

Третий уровень — уровень оперативно-календарного планирования и контроля функционирования всего комплекса. Здесь составляется и хранится план производства по объему и номенклатуре на смену, сутки, неделю и т. д., производятся контроль его выполнения, учет и анализ простоев оборудования. В состав этого уровня входят, кроме того, системы технической диагностики оборудования. Реализуется этот уровень на мини-ЭВМ. Все исполь-

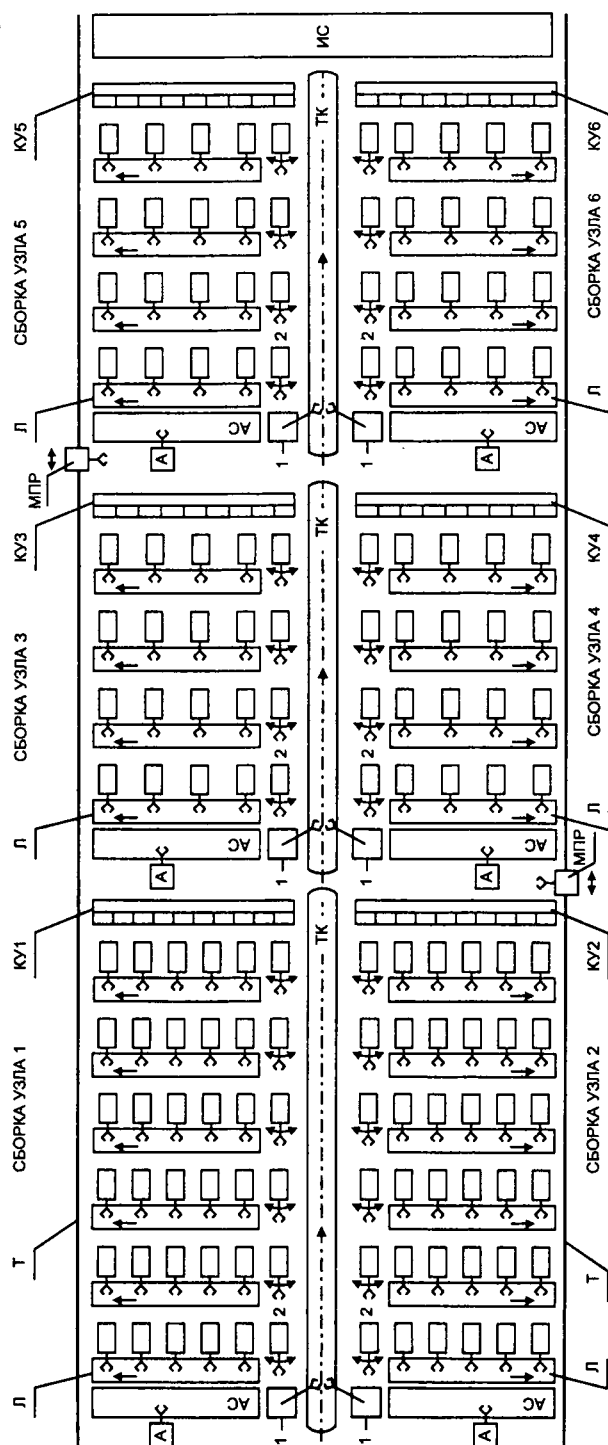


Рис. 14.7. Схема сборочного цеха: Л — робототехническая сборочная линия; КУ1—КУ6 — контроль узлов; АС — автоматизированный склад с оператором А; ТК — транспортный конвейер; 1 — ПР для взятия кассет со склада и установки их на конвейер; 2 — ПР для взятия кассет и передачи на сборку; МПР — мобильный ПР на трассе Т; ИС — испытательная станция

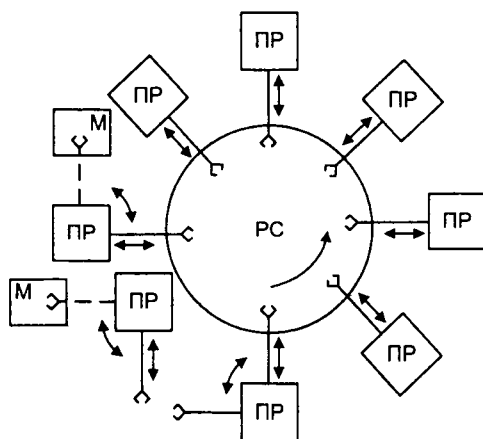


Рис. 14.8. Схема робототехнического сборочного участка с круговой компоновкой:
РС — роторный стол; М — магазин

зуемые в комплексе ЭВМ объединены в единую локальную информационно-вычислительную сеть.

Перечисленные три уровня управления являются основными и могут дополняться промежуточными уровнями. Так, системы управления отдельными технологическими ячейками в свою очередь могут иметь 2 уровня управления — уровень управления отдельными единицами входящего в ячейку оборудования и уровень совместного группового управления этим оборудованием в составе ячейки. В крупных комплексах типа цеха, содержащих несколько участков, наряду с системами управления этими участками обычно имеется следующий над ними уровень координации их работы. Особенности управления такими комплексами были рассмотрены в *главе 11*.

14.4. Особенности роботизации технологических комплексов в действующих производствах

Задача комплексной автоматизации и роботизации действующих производств имеет существенные особенности по сравнению с созданием новых технологических комплексов. В последнем случае создаваемый комплекс с самого начала проектируется с учетом применения средств робототехники, возможности применения ПР, поставляемых в комплекте с основным оборудованием, сопряжения систем управления всех составных частей и т. д. При решении этой задачи для действующего производства необходимо учитывать ограничения, обусловленные тем, что в этом случае речь идет о модернизации

в большей или меньшей степени не приспособленного для применения средств робототехники производства и его технологического оборудования. При этом часто не допускается также длительная остановка производства.

Основными трудностями при решении этой задачи являются:

- необходимость размещения средств робототехники на ограниченных площадях действующего технологического комплекса, включая обеспечение транспортных операций;
- необходимость обеспечения рационального использования возможностей применения ПР и их устройств управления, что в значительной степени определит стоимость и эффективность работы всего комплекса, а также удобство его эксплуатации;
- обеспечение требуемой производительности, т. е., как правило, ее существенного повышения, в том числе за счет соответствующего быстродействия ПР.

Существует и ряд других трудностей, связанных с управлением всем комплексом, особенностями конструкции основного оборудования и производимой продукции, однако они имеют меньшее значение.

При решении рассматриваемой задачи первостепенное значение имеет грузоподъемность ПР и других средств робототехники, поскольку она в основном определяет их размеры, а следовательно, и возможности размещения на рабочем месте вместо высвобождаемых рабочих. В связи с этим при решении вопроса о применении ПР в действующем производстве необходимо различать следующие три приведенные в табл. 14.2 основных случая, определяемых массой объектов, которыми надлежит манипулировать.

Таблица 14.2. Особенности применения промышленных роботов в действующем производстве в зависимости от массы объектов манипулирования

Масса объектов манипулирования	Область применения	Занимаемый объем и условия размещения	Типовые решения
Доли килограмма	Приборостроение, легкая промышленность	ПР занимают мест меньше, чем рабочий, поэтому разместить их на рабочем месте не сложно	При использовании ПР для обслуживания основного оборудования ПР размещаются непосредственно на оборудовании

Таблица 14.2 (окончание)

Масса объектов манипулирования	Область применения	Занимаемый объем и условия размещения	Типовые решения
Единицы килограммов	Машиностроение	ПР занимают больше места, чем рабочий, поэтому существует проблема их размещения в пределах существующего рабочего места	Подвесные ПР, в том числе подвижные (на рельсах)
Десятки килограммов и более	Тяжелое машиностроение, транспорт	ПР занимают места не больше, чем рабочий вместе с используемыми им специальными средствами механизации для работы с большими грузами	ПР, сбалансированные манипуляторы

Как следует из табл. 14.2, наиболее трудным случаем применения ПР и манипуляторов на действующем производстве является работа с изделиями, масса которых измеряется единицами килограммов (примерно до 25 кг), когда для размещения ПР необходимо больше места, чем для заменяемых ими рабочих.

Основным решением, которое в этом случае приемлемо практически почти всегда, является применение подвесных ПР, в частности, с размещением их над основным оборудованием, которое обслуживает такой ПР. Такое решение получило достаточно широкое распространение, например, в механообработке. При этом часто используются мобильные ПР, передвигающиеся над основным оборудованием по рельсовому пути, что дает возможность обслуживать одним ПР несколько станков.

Наряду с ПР для рассматриваемых целей достаточно широкое применение находят *сбалансированные манипуляторы*. Размещаясь на вертикальной колонне, они занимают значительно меньше места, чем ПР той же грузоподъемности, благодаря чему их часто можно устанавливать в действующих цехах без перемещения основного оборудования. Кроме того, такие манипуляторы дешевы и просты в эксплуатации. Их применение позволяет облегчить условия труда, повысить производительность и за счет этого сократить количество рабочих.

14.5. Гибкие производственные системы

Рассмотрим теперь особенности применения средств робототехники при создании новых комплексно-автоматизированных производств. Их высшей формой являются *гибкие автоматизированные производства* (ГАП). Такие производства позволяют быстро переходить на выпуск новой продукции, осуществлять ее модернизацию, совершенствовать технологию производства, прежде всего, путем смены управляющих программ. Создание и внедрение ГАП выходит за рамки робототехники, однако ПР являются важным универсальным компонентом таких производств.

На рис. 14.9 приведен типовой состав ГАП. Как здесь показано, в наиболее полном виде такое производство состоит из двух частей.

- ☐ Гибкая производственная система (ГПС), которая непосредственно реализует технологический процесс изготовления изделий (*в параграфе 11.3* была рассмотрена ее система управления).
- ☐ Автоматизированные системы проектирования подлежащих изготовлению изделий и технологической подготовки их производства, реализуемые с помощью показанных в нижней части рисунка автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Эти части объединены общей автоматизированной системой управления (АСУ) на базе локальной компьютерной сети.

Предел, к которому стремится процесс гибкой автоматизации производства, можно кратко определить так:

- ☐ автоматическое производство изделий сколь угодно малыми партиями;
- ☐ себестоимость и производительность, близкие к достигнутым в современном массовом производстве;
- ☐ практически безлюдное производство — количество работающих по сравнению с существующим меньше на 2 порядка;
- ☐ комплексная автоматизация всех частей производства, включая технологические процессы, подготовку производства, разработку документации на выпускаемые изделия, планирование и управление производством в целом.

Таким образом, в максимально полном исполнении ГАП на его вход поступают технические задания на очередное изделие, а на выходе — готовая продукция. При этом весь процесс может происходить непрерывно на основе машинных носителей информации, т. е. без бумажной документации.

Для мелкосерийного производства степень его гибкости характеризуется количеством типов изделий, которые могут изготавливаться путем смены только программ. Типичные значения этой величины для современных ГАП

механообработки — десятки типов деталей и сотни их модификаций. Антиподом ГАП в отношении гибкости являются автоматические линии с так называемой жесткой автоматизацией (рис. 14.10) [17].

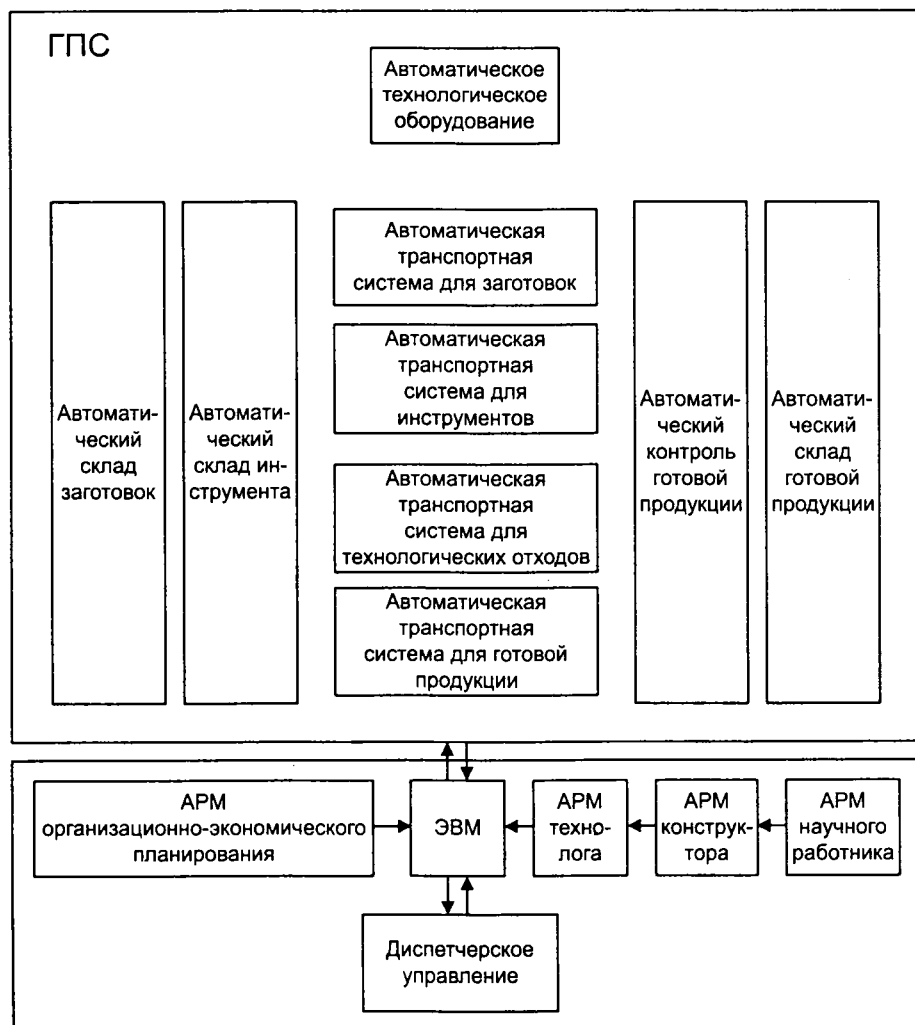


Рис. 14.9. Состав гибкого автоматизированного производства

В мире внедрение гибкой автоматизации связывают со следующими конкретными достоинствами:

- повышение конкурентоспособности продукции (за счет более быстрой сменяемости выпускаемых изделий, повышения их качества, экономии ресурсов и труда);

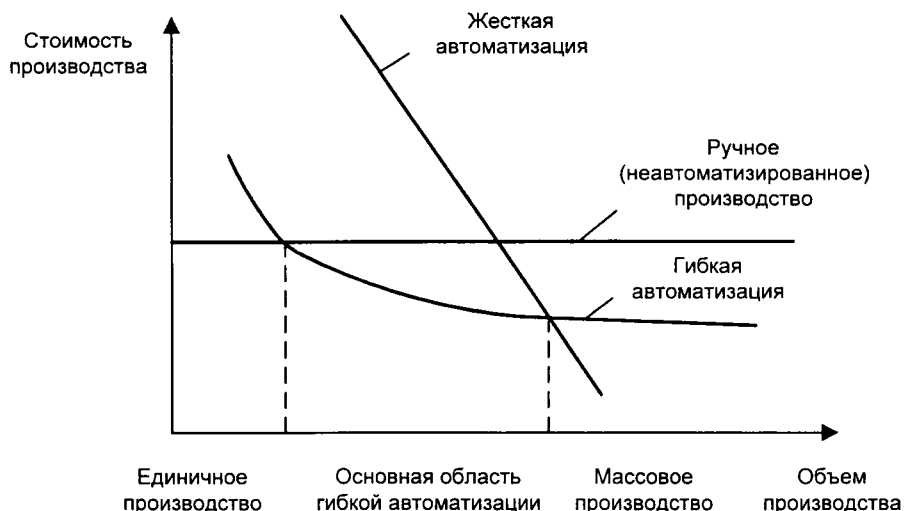


Рис. 14.10. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства

- ☐ рост производительности;
- ☐ стабилизация производства и ускорение оборачиваемости капитала;
- ☐ повышение эффективности использования рабочей силы;
- ☐ создание новых технологических процессов и производств.

Основным принципом построения гибких производств является компоновка их из комплектно-поставляемых унифицированных модулей. В соответствии с составом ГАП, показанным на рис. 14.9, основными такими модулями являются технологические модули-ячейки, модули транспортные (в том числе на базе транспортных навесных и напольных роботов), складские (в том числе с роботами-штабелерами), модули контроля качества продукции и технической диагностики оборудования. Последние модули образуют систему автоматического контроля качества, без которой невозможна автоматическая работа всего комплекса. В задачи таких систем входят собственно измерение контролируемых параметров, регистрация результатов этих измерений, визуализация их на терминалах, подача управляющих воздействий в системы управления оборудованием, когда по этим параметрам необходима автоматическая корректировка технологических процессов (например, в случае адаптивного управления станками, учитывающего износ инструмента, изменение размеров заготовок и т. п.). Примером оборудования, используемого в системах автоматического контроля ГАП, являются робототехнические контрольно-измерительные машины (см. параграф 15.2).

ГЛАВА 15

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ НА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

15.1. Классификация технологических комплексов с роботами на основных технологических операциях

Как было отмечено в *главе 1*, с начала развития современной робототехники по мере совершенствования роботов происходит устойчивый рост доли ПР, применяемых на основных технологических операциях. В 1980—1981 гг. их доля в общем парке роботов превысила 50 %. Опыт показывает, что, хотя внедрение ПР на основных операциях требует значительно бóльших (в 3—4 раза) затрат, чем на вспомогательных операциях, именно здесь достигается наибольшая эффективность применения ПР при высвобождении рабочих. Велик и социальный эффект в связи с вредностью для человека ряда таких операций (например, окраска, сварка) или с их монотонностью (например, сборка на конвейере). В машиностроении основными типами технологических комплексов, в которых ПР получили широкое применение на основных операциях, являются комплексы сборки, сварки, нанесения покрытий, шлифования, зачистки, клепки. Помимо машиностроения к таким комплексам относятся также комплексы для бурения в горном деле, монтажа огнеупоров в металлургии, для монтажных и облицовочных работ в строительстве, упаковки штучной продукции в легкой и пищевой промышленности.

15.2. Сборочные робототехнические комплексы

Этот тип робототехнических комплексов по своему значению является, пожалуй, наиболее важным. Сборочные операции в машиностроении составля-

ют до 50 % себестоимости изделий, а в приборостроении еще больше — до 50—60 %. Вместе с этим степень автоматизации сборочных работ сегодня весьма низка в связи с ограниченными возможностями традиционных средств автоматизации в виде специальных сборочных автоматов. Такие автоматы применимы главным образом в массовом производстве, в то время как, например, в машиностроении до 80 % продукции относится к серийному и мелкосерийному производству. Поэтому создание гибких сборочных комплексов на базе ПР является одним из основных направлений в автоматизации сборочных операций.

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

- ☐ загрузка собираемых деталей в загрузочные и транспортные устройства (обычно с их ориентацией);
- ☐ перемещение деталей к месту сборки;
- ☐ базирование, т. е. фиксация в строго определенной позиции, с ориентацией деталей на сборочной позиции;
- ☐ собственно операция сборки, т. е. сопряжения деталей, включая часто закрепление;
- ☐ контрольно-измерительные операции в ходе сборки;
- ☐ удаление собранного узла со сборочной позиции для перемещения его на следующую позицию, если сборка не закончена.

Каждая из этих операций принципиально может быть выполнена с помощью ПР, но не всегда это целесообразно. В тех, например, случаях, когда требуется перемещение по одной координате, более простым решением может быть применение устройств типа толкателей. В других случаях могут применяться специальные ориентаторы и простые однопрограммные механические руки. Роль ПР в сборочных комплексах наряду с более простыми и специальными средствами автоматизации может быть различной. Зависит она прежде всего от конкретных требований к гибкости комплекса, что в свою очередь определяется серийностью выпускаемой продукции. Поэтому рассмотрим роль ПР в сборочных комплексах, которые можно классифицировать следующим образом в зависимости от объема выпускаемой продукции, начиная с массового производства и заканчивая единичным:

1. Специальные сборочные автоматы для массового и крупносерийного производства с возможным применением простых автоматических манипуляторов на вспомогательных и отдельных основных сборочных операциях.
2. Робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства, в которых сборочные операции выполняют специальные ПР с цикловым управлением.

3. Робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства на базе универсальных и специализированных ПР, каждый из которых может осуществлять различные сборочные операции за счет смены инструмента (в том числе непосредственно и в процессе сборки изделия).
4. Робототехнические сборочные комплексы для серийного производства, в которых вся сборка выполняется одним универсальным ПР.
5. Робототехнические сборочные комплексы для серийного производства с участием человека в управлении ПР или в выполнении им отдельных операций вручную.

Включение человека непосредственно в процесс сборки может вызываться либо экономическими соображениями, либо технической невозможностью автоматизировать отдельные сложные операции (например, некоторые регулировочные и настроечные действия), либо необходимостью оперативного подключения человека в аварийных ситуациях, когда автомат по какой-то причине не справляется с заданием, либо, наконец, временно на этапе освоения сборки нового изделия (в том числе и как один из способов программирования методом обучения).

Примерами специальных сборочных автоматов, указанных в пункте 1 приведенной классификации, являются автоматы для монтажа печатных плат и сборочные роторные линии, используемые в массовом и крупносерийном производствах. Средства робототехники находят здесь ограниченное применение в основном для обслуживания (операций загрузки-выгрузки).

На рис. 15.1 показан участок одного из первых отечественных робототехнических сборочных комплексов массового производства механических наручных часов на базе специальных ПР, относящийся к пункту 2 приведенной классификации. На прямоточной транспортной системе закреплено приспособление-спутник, которое перемещается от позиции к позиции с фиксацией через равные промежутки времени. Сборка осуществляется по принципу параллельно-последовательной сборки на всех позициях одновременно с последующим перемещением приспособления-спутника на очередной шаг. Установка оснащена специальными пневматическими ПР с приспособлениями, сменяемыми в зависимости от марки собираемых часов.

Сборочные линии, из которых состоит комплекс, включают транспортную систему, специальные ПР, пульт управления, вибробункеры, питатели, а также различную оснастку и приспособления. Детали и узлы часов поступают на позиции сборки из вибробункеров в ориентированном положении. Пластины часов, набранные в кассеты, автоматически устанавливаются в приспособления-спутники, которые являются составным элементом прямоточной транспортной системы. Роботы производят установку деталей или узлов в платину часов в заданной последовательности. Для того чтобы обеспечить условия

собираемости, платина часов фиксируется снизу с помощью специального приспособления. Применение таких комплексов позволяет в 6—8 раз повысить производительность, улучшить качество сборки часов, ликвидировать монотонный ручной труд и поднять культуру производства.

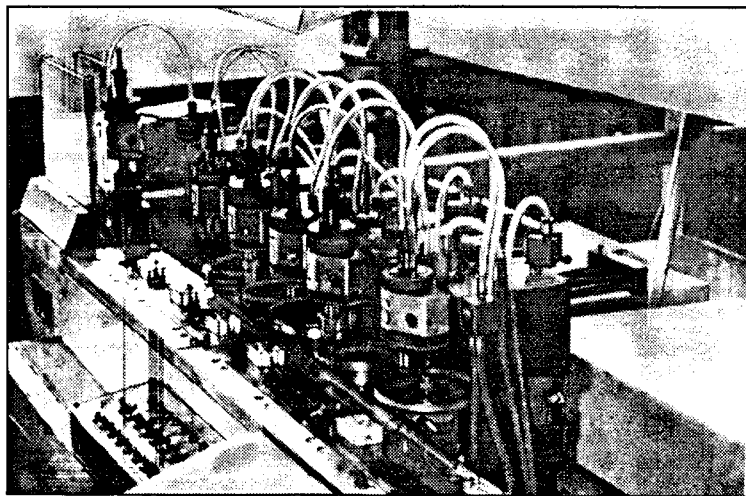


Рис. 15.1. Робототехническая сборочная линия массового производства наручных часов

На рис. 15.2 показан пример сборочной робототехнической линии, построенной на базе универсальных ПР (пункт 3 приведенной классификации).

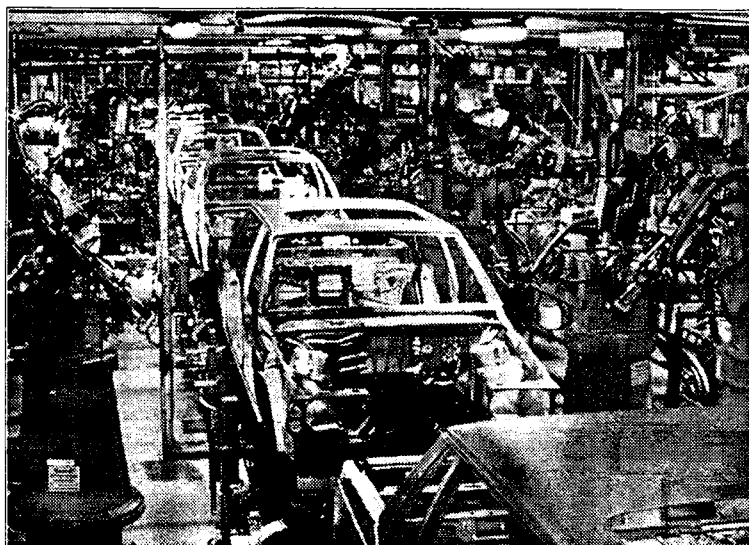


Рис. 15.2. Робототехническая линия сборки автомобилей Volvo (Volvo, Швеция)

Следующим типом робототехнических сборочных комплексов, которые оказываются экономически более выгодными при меньшей серийности производства, являются комплексы с ПР, последовательно выполняющими различные сборочные операции на одном рабочем месте вплоть до полной сборки целого изделия (пункт 4 приведенной ранее классификации). Такое построение комплекса существенно повышает его гибкость, позволяя программно изменять число сборочных операций без изменения количества используемых ПР, что неизбежно, когда каждый ПР выполняет только одну операцию. В таких комплексах у ПР в ходе сборки многократно сменяются рабочие органы при переходе от одной операции к другой. Примерами ПР, предназначенных для такой многооперационной сборки, являются электро-механические ПР типа показанных на рис. 3.5 и 3.8.

На рис. 15.3 показан один из первых робототехнических комплексов, осуществляющих сборку на одном рабочем месте такого достаточно сложного изделия, как пылесос. Комплекс смонтирован на сборочном столе и включает 2 электро-механических манипулятора (1, 2) с 8 степенями подвижности (первый работает в вертикальной плоскости, а второй — в горизонтальной) и 7 телевизионных камер. Три из них α , β , γ ориентированы вертикально, а четыре А, В, С, D — горизонтально. Захватное устройство горизонтального манипулятора снабжено датчиками тактильными и усилия. Пылесос 3 собирается из трех узлов: фильтра 4, электродвигателя 5 и корпуса 6, которые поступают на сборку неориентированными.

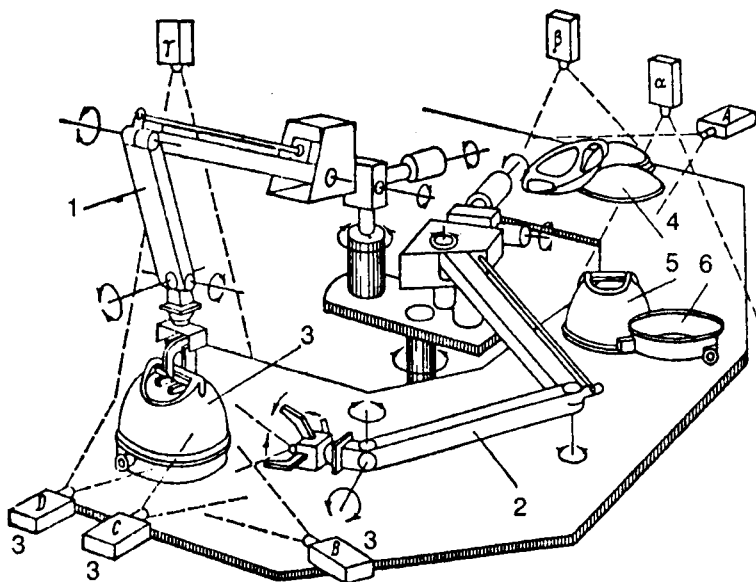


Рис. 15.3. Робототехнический комплекс сборки пылесосов (Hitachi, Япония)

Близки к сборочным роботам и часто применяются вместе с ними роботы для контроля размеров — измерительные машины. Их рабочим органом является измерительный шуп, которым производится ощупывание контролируемого изделия в нужных точках. Обычно такие измерительные машины имеют прямоугольную систему координат и ЧПУ, обеспечивающее точность до единиц микрометров. На рис. 15.4 показан пример такой измерительной машины.

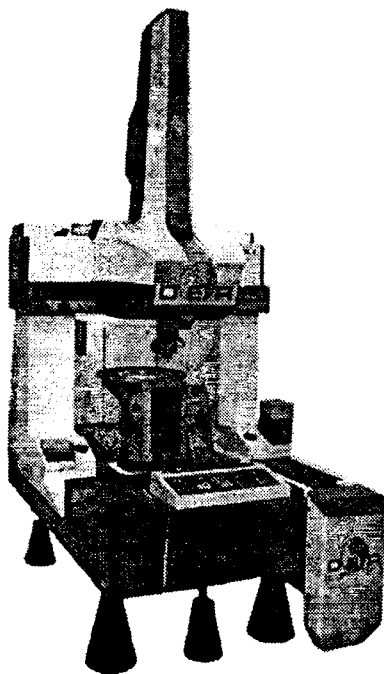


Рис. 15.4. Координатно-измерительная машина (DEA, Италия)

15.3. Сварочные робототехнические комплексы

Сварка — одна из технологических операций наиболее широкого применения ПР, где сосредоточено до половины их парка. Из многочисленных видов сварки ПР получили основное применение на контактной точечной и дуговой, а также на электронно-лучевой сварке. Контактная точечная сварка осуществляется путем нагрева импульсным электрическим током. Рабочими органами для выполнения такой операции являются сварочные клещи (см. рис. 7.1). Существуют сварочные ПР, у которых манипулятор заканчива-

ется одним электродом, а вторым электродом служит само свариваемое изделие. Пример такого робота приведен на рис. 15.5. Промышленные роботы для контактной точечной сварки имеют специальную конструкцию, которая предусматривает размещение сварочного трансформатора и токопроводящего кабеля, идущего от него к сварочным клещам. Сварочный трансформатор расположен обычно на манипуляторе ПР, в том числе и непосредственно в его рабочем органе (для того чтобы максимально сократить длину кабеля от трансформатора к сварочным клещам, по которым проходит большой импульсный сварочный ток). Грузоподъемность манипуляторов таких сварочных ПР составляет 20—30 кг. Управление ПР для контактной точечной сварки — дискретное позиционное. Устройство управления должно быть рассчитано на работу в условиях сильных электромагнитных помех, создаваемых импульсами сварочного тока.

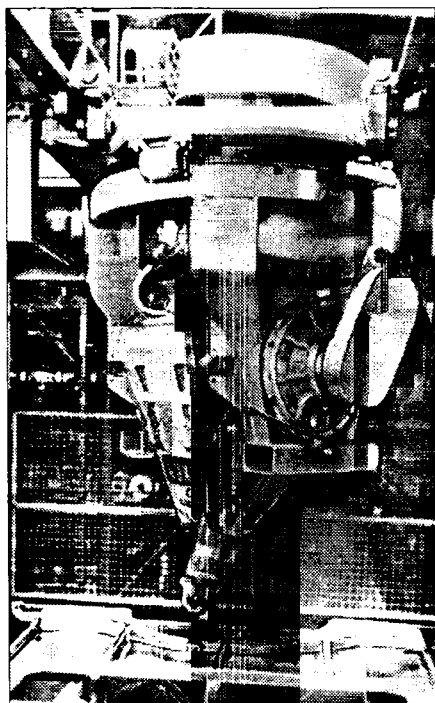


Рис. 15.5. Сварочный робот (KUKA, Германия)

Наиболее широко контактная точечная сварка с помощью ПР применяется в автомобилестроении (сварка кузовов), судостроении и вагоностроении. На рис. 15.6 показан участок сварки кузовов автомобилей с помощью ПР.

Дуговая сварка — более сложный технологический процесс, чем контактная точечная. Он требует осуществлять непрерывное перемещение сва-

рочного электрода или горелки с определенной скоростью по сложной траектории, формирующей свариваемый шов, с одновременным поперечным его перемещением. Электрод при этом должен сохранять определенную ориентацию по отношению к плоскости шва. Грузоподъемность манипуляторов ПР для дуговой сварки меньше чем ПР для контактной точечной и не превышает 5—8 кг. Промышленные роботы для дуговой сварки часто комплектуются столом с несколькими угловыми степенями подвижности для размещения на нем свариваемых изделий и манипулирования ими перед ПР.

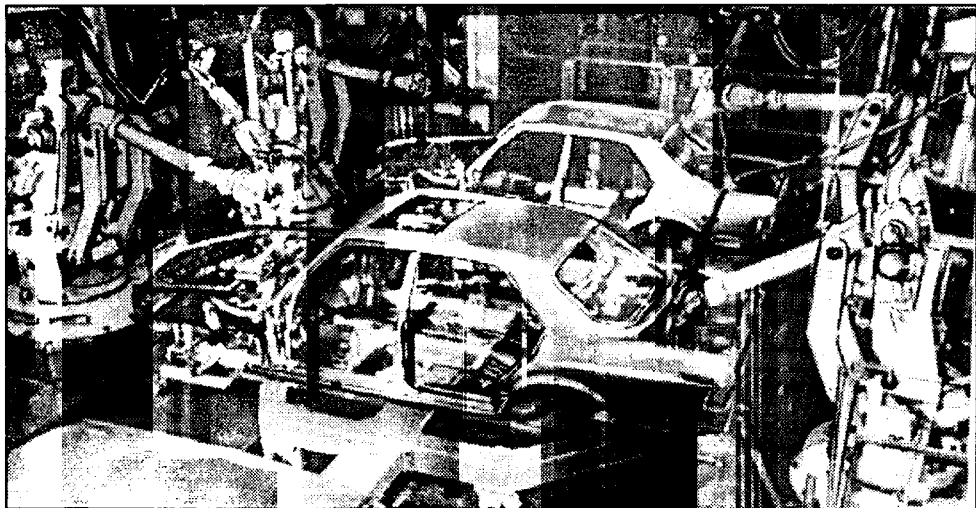


Рис. 15.6. Участок точечной сварки роботами кузовов автомобилей

В функции устройства управления ПР для дуговой сварки помимо управления движением входит еще регулирование параметров режима сварки (тока, напряжения дуги, притока газа и т. д.). Управление при этом должно быть адаптивным. Основные задачи адаптации — поиск начала шва, слежение за кромками свариваемых деталей и ориентация рабочего органа. Кроме того, адаптация требуется при регулировании технологических параметров собственно процесса сварки с учетом состояния внешней среды.

Для контроля положения рабочего органа относительно кромок свариваемых деталей применяют контактные и магнитные датчики, ультразвуковые и оптические дальномеры, телевизионные системы. На рис. 15.7 показан робототехнический комплекс для дуговой сварки в комплекте с манипуляционным столом — так называемый *сварочный центр*.

Электронно-лучевая сварка осуществляется в вакууме путем перемещения электронного пучка, создаваемого электронной пушкой, по линии шва. Этот вид сварки интересен тем, что в отличие от обычных механических манипу-

ляторов здесь манипулирование производится электронным лучом с помощью отклоняющего магнитного или электрического полей. (Хотя существуют установки и с перемещением не луча, а стола, на котором крепятся свариваемые детали.) Управление движением луча по шву осуществляется в простейших случаях по жесткой программе, а для наиболее сложных стыков — с применением адаптивного управления и обратной связи через систему технического зрения.

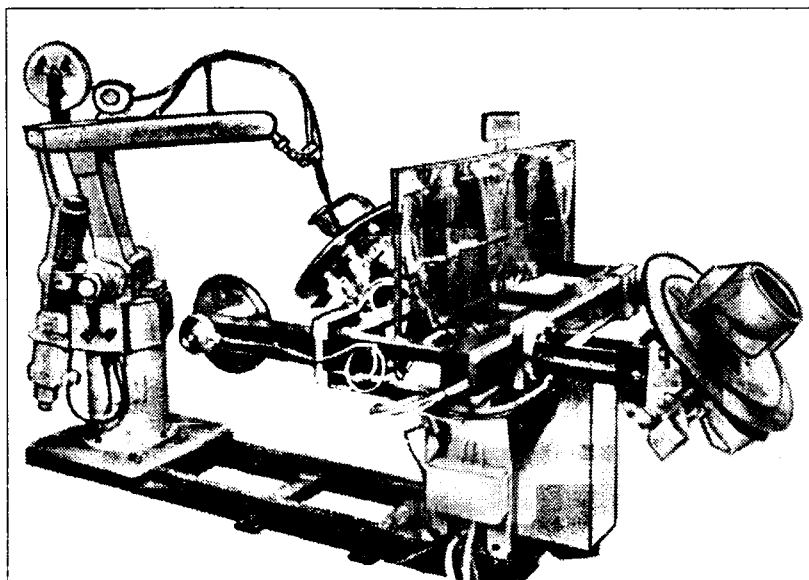


Рис. 15.7. Робототехнический сварочный центр для дуговой сварки (Motoman, Япония)

С робототехническими комплексами сварки схожи комплексы для пайки и резки — дугой, лазерным лучом, плазмой. Последние, в частности, широко применяют для раскроя материала.

15.4. Робототехнические комплексы для нанесения покрытий

Промышленные роботы нашли применение на операциях нанесения различных покрытий: лакокрасочных, защитных, упрочняющих, герметизирующих и т. п. Операции эти для человека не только физически тяжелы, но и вредны для дыхания. В большинстве случаев нанесение покрытий связано с применением взрыво- и пожароопасных веществ. Поэтому используемые на таких операциях ПР должны иметь взрывобезопасное исполнение. Для нанесения покрытий широко применяют пульверизаторы. На рис. 15.8 показан ПР

с пульверизатором в качестве рабочего органа. Робот такого же назначения показан на рис. 4.7. Управление такими ПР — непрерывное (контурное) с программированием методом обучения. По сравнению со сварочными ПР требование к точности ПР для нанесения покрытий существенно ниже, а к быстродействию, наоборот, выше. Применяется в этих ПР и адаптивное управление с использованием системы технического зрения для определения контуров очередного изделия, на которое должно быть нанесено покрытие. По полученным данным автоматически выбирается и корректируется управляющая программа для ПР.



Рис. 15.8. Робототехнический комплекс окраски кузовов автомобилей (Dürr, Германия)

Другим вариантом технологии нанесения покрытий является использование для этого электростатического поля. Данный способ обеспечивает более высокое качество покрытия и более экономичен. Однако высокое напряжение (десятки киловольт) создает дополнительную взрывоопасность, что ограничивает область применения окрасочных ПР с такого типа распылителями.

Широкое применение получили средства робототехники для нанесения гальванических покрытий. Основная манипуляционная операция в этом случае — погружение в ванны деталей или корзин с деталями и перемещение их от одной ванны к другой. Операция эта выполняется с помощью простых однопрограммных автооператоров. На рис. 15.9 показана линия гальванопокрытий. Сегодня тысячи автооператоров заменяют рабочих на этом вредном производстве.

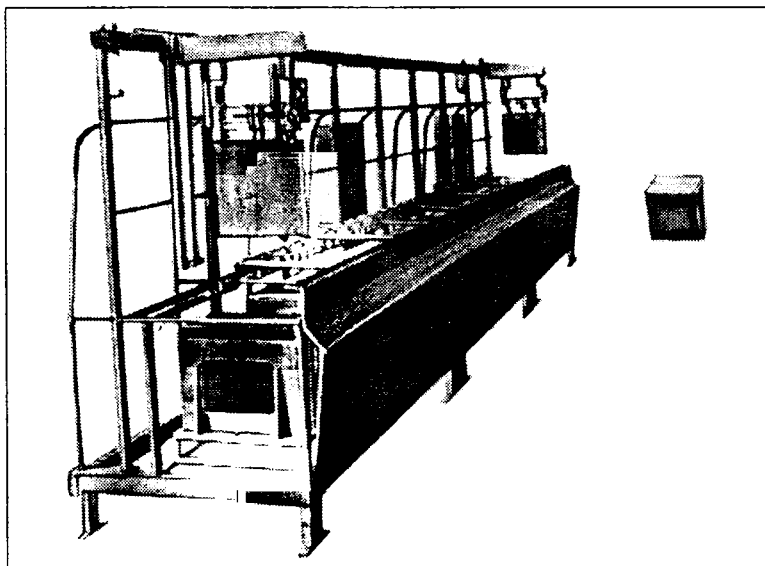


Рис. 15.9. Линия гальванопокрытий с автооператорами

Близки к процессу нанесения покрытий пескоструйная и дробеструйная обработки поверхностей. На этих операциях также нашли применение ПР с непрерывным управлением. Из других основных технологических операций, на которых используются ПР с непрерывным управлением, следует назвать шлифование, зачистку (например, отливок), обрубку облоя.

ГЛАВА 16

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ НА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

16.1. Классификация роботизированных технологических комплексов

Одна из актуальных задач робототехники — замена рабочих, занятых на вспомогательных операциях. Хотя, как было отмечено ранее, стоимость автоматизации вспомогательных операций в 3—4 раза ниже, чем основных, степень их автоматизации почти вдвое ниже. В результате сегодня около половины рабочих, занятых в промышленности, работают на таких наименее престижных и не требующих высокой квалификации ручных операциях. *Роботизированные технологические комплексы (РТК)*, в которых ПР используются на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования, и сами такие ПР классифицируются по виду основного технологического процесса или реализующего его основного технологического оборудования. Основными по значению типами таких РТК являются РТК механообработки, штамповки, прессования пластмасс, горячей штамповки иковки, литья под давлением и внутрицехового транспорта.

16.2. Роботизированные технологические комплексы механообработки

Одна из важных областей применения ПР на вспомогательных операциях — обслуживание металлорежущих станков. Здесь ПР выполняют наиболее типичную вспомогательную операцию загрузки-разгрузки оборудования, т. е. установки обрабатываемой детали и снятия ее по окончании обработки. Аналогичные операции осуществляют ПР и при обслуживании других видов тех-

нологического оборудования. Имеются еще и некоторые более специальные вспомогательные операции, выполняемые ПР, такие как смазка пресс-форм, погружение деталей в жидкость, межоперационная транспортировка, штабелерование и т. д.

Основным технологическим оборудованием в РТК механообработки являются станки — токарные, сверлильные, фрезерные, зубообрабатывающие, шлифовальные и т. д. К технологическому оборудованию предъявляются следующие требования: автоматический режим работы, согласуемость его системы управления с системой управления ПР, возможность доступа манипулятора ПР в зону установки детали на станке.

Для обеспечения автоматического режима РТК в его состав должны входить устройства удаления стружки, смазки и охлаждения рабочих органов и инструмента, очистки поверхностей базирования, средства контроля качества обработки изделий, магазины с поштучной выдачей ориентированных деталей. В соответствии с первым требованием, предъявляемым к РТК, основным типом станков для них являются станки с ЧПУ.

Вследствие значительного времени механообработки в таких комплексах, как уже отмечалось в *параграфе 14.2*, широкое применение получило обслуживание одним ПР нескольких станков. Варианты соответствующих компоновок РТК со стационарными и мобильными ПР приведены на рис. 14.3—14.5.

Для обслуживания станков в простейших случаях применяют ПР с цикловым управлением, а наиболее общим вариантом является использование дискретных позиционных ПР. Эти ПР перепрограммируются в среднем один раз в неделю. Средняя длительность цикла работы таких ПР — минуты.

На рис. 16.1, *а* показана простейшая роботизированная технологическая ячейка "станок-ПР". Деталь, которую надо обработать, ПР берет из левого магазина. В нем детали расположены в ориентированном положении в ячейках или подаются поштучно к ПР. По окончании обработки ПР снимает деталь со станка и кладет в правый магазин. Из таких ячеек собирают участки, подобные показанному на рис. 14.5. При последовательном соединении подобных ячеек в линию все последующие ячейки получают детали из магазина на выходе предыдущей ячейки. Однако для левого магазина самой первой ячейки необходимо предварительное ориентированное размещение в нем деталей, получаемых в общем случае в неориентированном виде, т. е. навалом.

Принципиально возможны следующие варианты решения этой задачи:

- ☐ применение специального ориентирующего устройства, например, в виде вибробункера (рис. 16.1, *б*);
- ☐ использование для загрузки магазина адаптивного ПР;
- ☐ применение такого ПР для обслуживания станка первой ячейки (рис. 16.1, *в*).

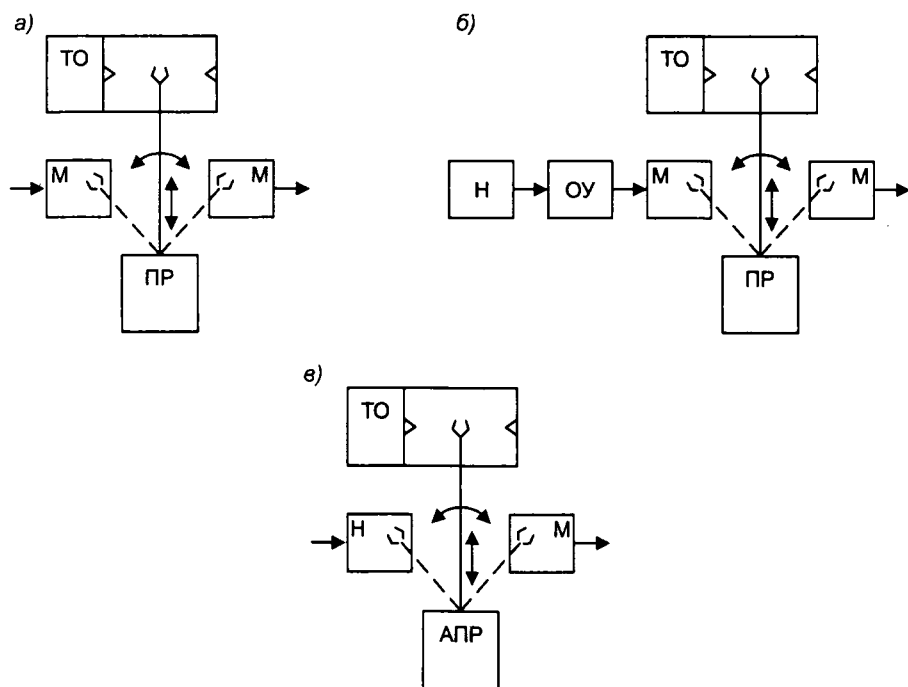


Рис. 16.1. Компоненты роботизированных технологических ячеек "станок-ПР":

ТО — основное технологическое оборудование; М — магазин выдачи ориентированных деталей; ОУ — ориентирующее устройство; Н — детали навалом; АПР — адаптивный ПР

Основной недостаток применения адаптированных ПР — их значительная стоимость. Поэтому в тех случаях, когда могут быть использованы специальные ориентирующие устройства, они являются более предпочтительными. К сожалению, область их применения, как и вообще всех специальных устройств, ограничена крупносерийным и серийным производствами с достаточно редкой сменяемостью обрабатываемых деталей. Для ослабления этого ограничения создаются перестраиваемые ориентирующие устройства (со сменными частями и т. п.).

Вариант использования адаптивных ПР непосредственно для обслуживания станков в основном применим только при достаточно длительном цикле обработки деталей на станке, продолжительность которого позволяет осуществлять обслуживание одним ПР нескольких станков (см. рис. 14.3 и 14.4). В этом случае стоимость ПР соответственно распределяется на несколько технологических ячеек.

На рис. 14.5 была приведена схема роботизированного участка механообработки, а на рис. 16.2 показан цех механообработки, в котором автоматизированы все операции, включая транспортно-складские. Система управления

включает ЭВМ, устройство беспроводной связи и пульт с речевым командным устройством.

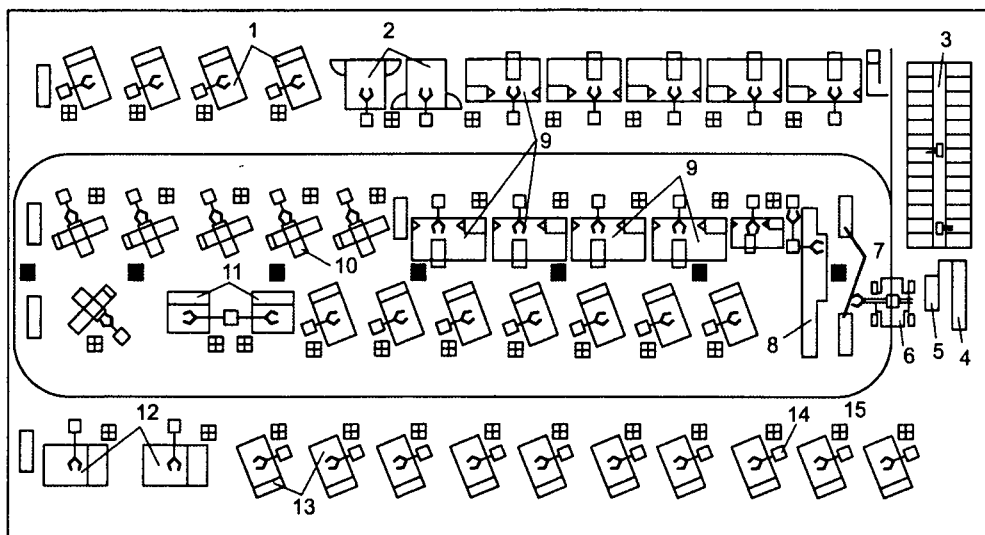


Рис. 16.2. Роботизированный цех механообработки: 1, 2, 11, 12, 13 — токарные станки; 3 — склад; 4 — загрузочное устройство; 5 — разгрузочное устройство; 6 — напольный транспортный ПР; 7 — промежуточные склады; 8 — протяжной станок; 9 — шлифовальные станки; 10 — фрезерные станки; 14 — ПР; 15 — магазины

16.3. Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки

Еще одной областью широкого применения ПР является холодная листовая штамповка. Объясняется это большим травматизмом обслуживающих прессы рабочих, достигающим 30 %, и монотонностью этой работы, а также простотой применения на этих операциях ПР. Промышленный робот используется здесь, как и в механообработке, прежде всего для выполнения операций загрузки-разгрузки: загрузка прессов исходным листовым материалом (подача листа в штамп) и разгрузка штампа (съем штамповки и укладка ее в магазин). На рис. 14.1 и 14.2 были показаны основные компоновки РТК холодной штамповки.

Особенностью применения ПР на холодной штамповке по сравнению с механообработкой является необходимость обеспечить значительно большее быстродействие, поскольку цикл работы прессы измеряется всего несколькими секундами. Используемые здесь ПР имеют простое цикловое управление, как правило, цилиндрическую систему координат манипулятора и три степени

подвижности. Захватное устройство чаще всего выполняется в виде вакуумных присосок. Для обеспечения необходимой быстроты обслуживания пресса часто применяют ПР с двумя манипуляторами — один для загрузки, а другой для разгрузки штампа. Иногда разгрузку осуществляют с помощью толкателя, устанавливаемого на станине пресса, или сдуванием штамповки сжатым воздухом.

На рис. 16.3 показан пример планировки цеха холодной листовой штамповки радиозавода. АСУ цеха осуществляет планирование производства, включая определение потребностей в материалах, заготовках, планирование и управление для отдельных участков, складов и транспортных систем, решение других задач цеха, в том числе обмен информацией с АСУ завода.

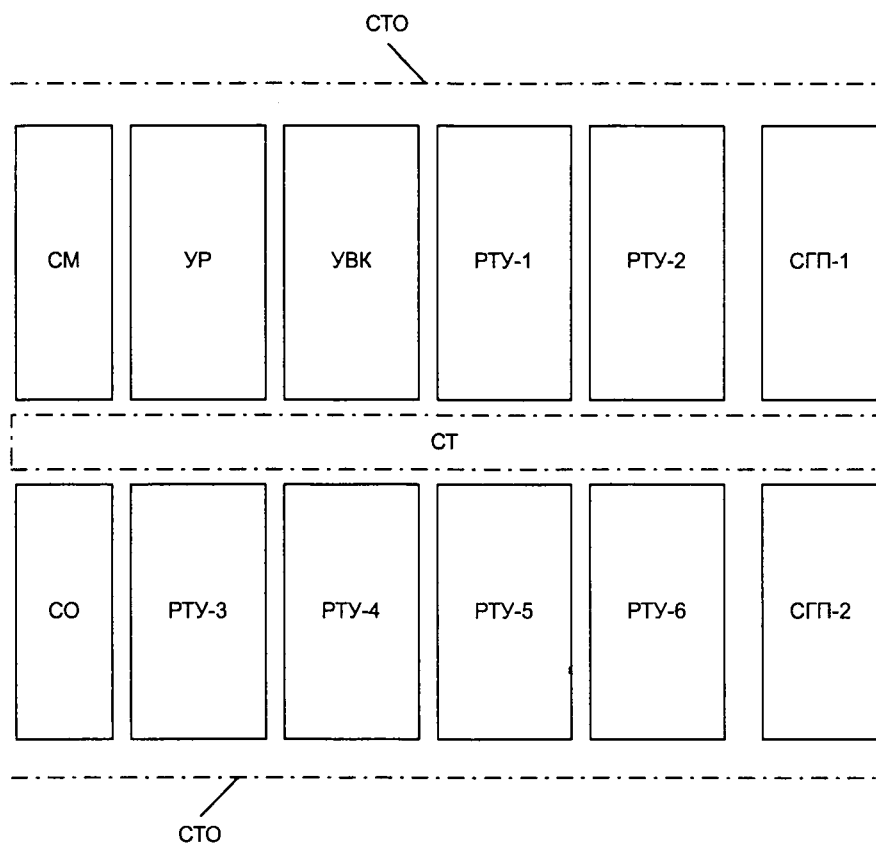


Рис. 16.3. Планировка роботизированного цеха холодной листовой штамповки:

СМ — склад материалов; СО — склад оснастки; УР — участок раскроя; УВК — участок вырубki и кассетирования; РТУ-1—РТУ-6 — роботизированные технологические участки; СТ — система транспортировки технологической оснастки, заготовок и готовой продукции; СТО — система транспортировки и сортировки отходов; СГП-1, СГП-2 — склады готовой продукции

Номенклатура изготавливаемых деталей включает такие типовые для радиотехнических изделий детали, как основания, платы, кронштейны, скобы и т. п. Исходный листовой материал на участке раскроя превращается в заготовки в виде полос. Лист раскраивается по картам, рассчитанным на компьютере. Заготовки сдаются на склад заготовок. Отсюда по команде АСУ цеха они поступают через транспортную систему на линию кассетирования и далее заполненные кассеты возвращаются на склад заготовок. Участки штамповки снабжаются заготовками и оснасткой через соответствующую транспортную систему, которая обеспечивает также транспортировку готовых деталей на склад готовой продукции. Транспортные системы построены на базе напольных транспортно-загрузочных роботов. Общее управление цехом осуществляет оператор с помощью пульта, на который поступает информация о выработке кассет с заготовками, заполнении магазинов готовой продукцией, положении транспортно-загрузочных роботов, возможных неисправностях в работе оборудования.

16.4. Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве

Основным стимулом для автоматизации кузнечно-штамповочного производства наряду с повышением производительности являются тяжелые условия работы в кузнечных цехах. Однако в отличие, например, от холодной штамповки задача комплексной автоматизации такого производства представляет значительные трудности, связанные со сложностью работы кузнеца. Поэтому наряду с ПР здесь широко применяют манипуляторы с ручным и автоматизированным управлением — ковочные телеоператоры, управляемые квалифицированными кузнецами.

Помимо собственно штамповки автоматизации подлежат операции загрузки заготовок в нагревательную печь, извлечения нагретой заготовки из печи, перемещения ее к ковочному прессу, манипулирования заготовкой при ковке, укладки готовой поковки в магазин. Кроме того, имеется еще ряд вспомогательных операций, таких как смазка и обдувка штампа (сдув окалины), обрезка облоя с детали и укладка его в тару.

На рис. 16.4 показана схема РТК горячей объемной штамповки, включающего два ПР: ПР1 — робот-кузнец и ПР2 — робот-обрубщик. Робот-кузнец ПР-1 обслуживает индукционную печь для нагрева заготовок ПИ и пресс горячей штамповки ПШ, а робот-обрубщик ПР-2 — обрезной пресс ПО для обрубки облоя с поковки. Поковки к обрезному прессу и облой в магазин транспортируются с помощью транспортеров.

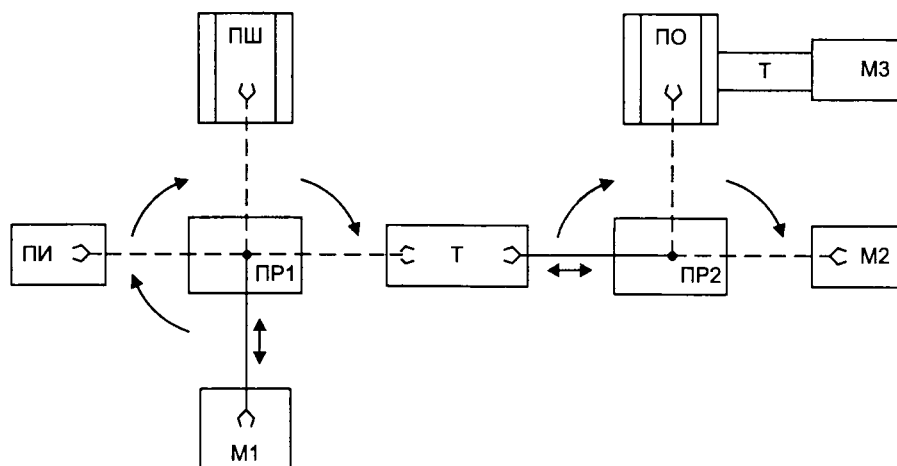


Рис. 16.4. Роботизированный комплекс горячей штамповки: ПИ — печь индукционная; ПШ — пресс кривошипный горячештамповочный; ПО — пресс обрубочный; ПР1 — робот-кузнец; ПР2 — робот-обрубщик; Т — транспортер; М1, М2, М3 — магазины для заготовок, поковок и облоя

Сегодня более 80 % номенклатуры поковок массой 25—500 кг изготавливаются методом свободной поковки. РТК свободной поковки включает обычно гидравлический пресс и манипулятор, с помощью которого оператор-кузнец осуществляет манипулирование заготовками при ковке.

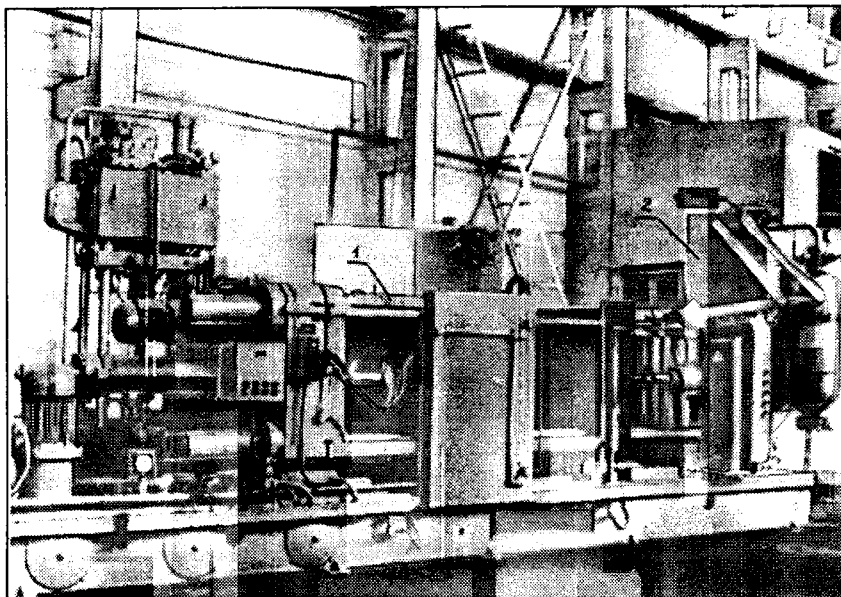
Система управления комплексом, выполненная на компьютере, предусматривает следующие режимы:

- ☐ полуавтоматическое управление прессом с помощью пульта управления;
- ☐ полуавтоматическое управление манипулятором с помощью задающей рукоятки на пульте управления;
- ☐ автоматическое управление по заранее введенной в память устройства управления программе (с возможностью оперативного вмешательства оператора путем прерывания выполнения программы с переходом на другую программу или другой режим управления);
- ☐ программирование манипулятора методом обучения с помощью управляющей рукоятки.

16.5. Роботизированные технологические комплексы литья под давлением

Процесс производства деталей методом литья под давлением заключается в заливке в машину литья под давлением определенной порции жидкого металла, взятого из печи, затем в удалении готовой отливки и подаче ее для

а)



б)

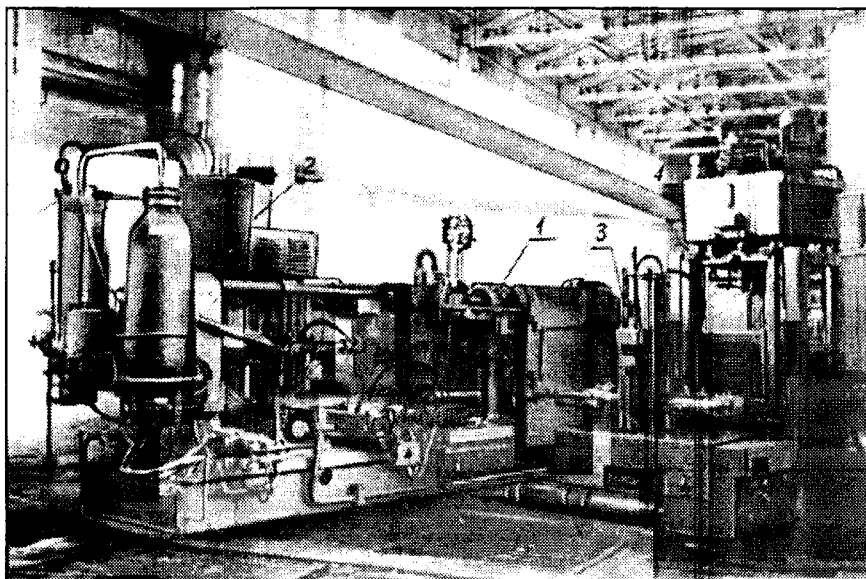


Рис. 16.5. Роботизированный комплекс литья под давлением:
а — вид со стороны робота-заливщика; б — вид со стороны робота, снимающего отливку:
1 — машина для литья под давлением; 2 — робот-заливщик;
3 — робот для снятия отливок; 4 — пресс для обрубки литников

обрубки литникового остатка. Кроме того, необходимо осуществлять смазку и обдув пресс-форм. Эффективность применения ПР для обслуживания машин литья под давлением связана с тем, что при обслуживании их рабочим значительны потери металла из-за неточности его дозирования и разбрызгивания при разливке, а также с простоем оборудования и снижением производительности из-за утомляемости рабочего. При этом условия труда являются не только тяжелыми, но и вредными для здоровья.

Роботизированный комплекс литья под давлением состоит из раздаточной печи, машины литья под давлением, пресса для обрубки литников, робот-заливщика и робота для взятия отливки и охлаждения ее в баке с водой. На рис. 16.5 показан участок литья под давлением, обслуживаемый двумя ПР. Робот-заливщик погружает свой рабочий орган — ковш — в расплавленный металл в раздаточной печи. Глубина погружения ковша определяет массу забираемого им металла и контролируется специальными контактными датчиками. После определенной выдержки времени, необходимой для разогрева и заполнения ковша, ковш поднимается, перемещается к приемнику металла машины литья под давлением и наклоняется для слива металла. После его полного слива осуществляется операция прессования. После раскрытия пресс-формы отливка выталкивается толкателем и переносится вторым роботом в бак с водой для охлаждения. Затем тем же роботом она подается на пресс для обрубки литников и сбрасывается в магазин.

ГЛАВА 17

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ В НЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ И В НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ОТРАСЛЯХ

17.1. Особенности применения средств робототехники в немашиностроительных отраслях

Помимо машиностроения и приборостроения средства робототехники все более широкое применение получают в угольной и горнодобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, строительстве, легкой и пищевой промышленности, на транспорте. Важность применения робототехники в этих областях очевидна уже из того факта, что здесь используется большая часть трудовых ресурсов страны, а степень автоматизации ниже, чем в машиностроении. Сегодня применение средств робототехники в немашиностроительных отраслях осуществляется прежде всего путем использования опыта машиностроительных отраслей по применению роботов на аналогичных операциях — для обслуживания основного технологического оборудования, на погрузо-разгрузочных работах, при выполнении таких основных операций, как нанесение покрытий, сварка, сборочно-монтажные работы и т. п. Опыт создания и применения средств робототехники в немашиностроительных отраслях пока невелик. Общее количество используемых здесь роботов и манипуляторов не превышает 20 % их общего парка. Анализ показывает, что только за счет использования роботов общепромышленного применения эта величина может быть увеличена примерно вдвое.

Однако для основной части производств в этих отраслях требуются роботы специальных типов. В табл. 17.1 приведены примеры использований средств

робототехники в немашиностроительных отраслях. Анализ технических требований к роботам, необходимым для этих отраслей, и условий их эксплуатации показывает, что в отличие от машиностроения здесь значительно меньше возможностей для применения роботов с чисто программным управлением, а требуются, прежде всего, роботы очувствленные с адаптивным управлением. Это объясняется тем, что в немашиностроительных отраслях существуют значительно большая неопределенность и изменчивость как параметров объектов манипулирования, так и внешней среды в целом. Здесь требуется большая доля мобильных роботов (в том числе для передвижения на открытой местности), роботов повышенной грузоподъемности и для работы в экстремальных условиях.

В горном деле важной задачей является создание робототехнических комплексов для безлюдной выемки полезных ископаемых. Это позволит высвободить сотни тысяч горняков от работы в тяжелых и опасных подземных условиях, повысить в 4—10 раз производительность труда, существенно снизить себестоимость добычи и свести к минимуму потери руды. В состав таких комплексов должны входить роботы для установки крепи-опалубки в забое, роботы-бурильщики шурфов, роботы-взрывники, роботы-погрузчики горной породы, роботы для проведения выработок. Подобные роботы должны быть мобильными, снабжаться, как правило, развитой системой очувствления, включая техническое зрение, несколькими манипуляторами и иметь взрывобезопасное исполнение.

Таблица 17.1. Примеры использования средств робототехники в немашиностроительных и непромышленных отраслях хозяйства

Операция	Тип средств робототехники
Угольная и горнодобывающая промышленность	
Установка крепи в забое	Мобильный робот с техническим зрением и двумя манипуляторами
Бурение шурфов	Многоманипуляторный мобильный робот с навигационной системой
Отделение угля от породы	Робот с техническим зрением и другими средствами очувствления
Погрузка горной массы	Мобильный робот-погрузчик
Погрузоразгрузочные работы в обога- тельном производстве	

Таблица 17.1 (продолжение)

Операция	Тип средств робототехники
Металлургия	
Загрузка чушек и металлолома в печь	Манипулятор, управляемый оператором
Ремонт огнеупорной кладки печей, домен	Мобильные роботы
Пробивка корки шлака и устранение анодного эффекта при электролизе алюминия	Роботы с техническим зрением и силовым очувствлением
Извлечение штырей в электролизерах и их перестановка	
Укладка и обвязка пакетов чушек, их погрузка и доставка	Манипуляторы, управляемые оператором
Лесозаготовительное производство	
Валочно-пакетирующие работы на лесосеках	Манипулятор с управлением от оператора
Деревообрабатывающее производство	
Погрузочные работы	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроительном производстве
Строительная промышленность	
Бетонные, строительно-монтажные, отделочные работы	Адаптивные мобильные роботы, оснащенные специнструментом
Облицовочные работы	Робот для монтажа облицовочных плиток
Монтаж металлоконструкций (зданий, мостов, резервуаров и т. п.)	Робот-монтажник-высотник
Окрасочные работы	Робот-маляр
Легкая и пищевая промышленность	
Обслуживание основного технологического оборудования (пряделные и швейные машины, агрегаты, формирующие синтетические нити, прессы горячей вулканизации, печи для обжига керамических изделий и т. п.)	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении и приборостроении

Таблица 17.1 (продолжение)

Операция	Тип средств робототехники
Внутрицеховые погрузоразгрузочные и транспортные работы	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении и приборостроении
Раскрой кожи и других материалов	
Укладка в тару конфет, овощей при консервировании и т. п.	
Погрузоразгрузочные работы в холодильниках	
Транспорт	
Погрузоразгрузочные работы	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении
Регламентное обслуживание железнодорожных путей	
Шагающие транспортные машины	
Агропромышленное производство	
Уборка овощей и фруктов	Мобильные оцувствленные роботы
Прополка и прореживание овощей	Робот с техническим зрением для работы в комплексе с прореживателями
Обслуживание теплиц	Мобильный робот (для выращивания рассады, уборки продукции)
Товарная доработка плодоовощной продукции (сортировка и загрузка в контейнеры)	Робот с техническим зрением и другими сенсорными системами
Обслуживание свиноводческих комплексов и комплексов для крупного рогатого скота	
Дойка и санитарная обработка вымени коров Стрижка овец	Специальные оцувствленные роботы
Погрузоразгрузочные работы с сельскохозяйственной продукцией, сеном, силосом, удобрениями и т. п.	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении
Вожделение тракторов и других сельскохозяйственных машин	Робот-тракторист

Таблица 17.1 (окончание)

Операция	Тип средств робототехники
Медицина	
Хирургия (микрохирургия, дистанционная хирургия, стерильная хирургия)	Прецизионные роботы и манипуляторы, управляемые оператором
Внутриполостная и внутрисосудистая диагностика	Мобильные микророботы
Протезирование конечностей	
Реабилитация инвалидов и больных	Роботы для массажа и физических упражнений
Уход за больными и инвалидами	Робот-сиделка
Помощь при передвижении слепых людей	Робот-поводырь
Сфера обслуживания	
Погрузоразгрузочные работы	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении
Охрана помещений	Робот с техническим зрением и другими сенсорными системами
Мойка окон высотных зданий	
Уборка помещений	Бытовые мобильные роботы
Уход за детьми	Робот-нянька, роботы-игрушки

На рис. 17.1 показан самоходный робототехнический проходческий комбайн, а на рис. 17.2 — робот-бурильщик шурфов.

На рис. 17.3 показан мобильный робот для очистки разливочных ковшей в металлургии.

На рис. 17.4 показан управляемый оператором лесосеяный робот.

На рис. 17.5 приведен пример строительного робота.

На рис. 17.6 показан пример использования роботов на железнодорожном транспорте для мытья, дезинфекции и окраски вагонов. Гидравлический робот с контурным управлением, снабженный сменными рабочими органами, размещен на подвижном основании. Основание перемещается оператором внутри вагона с помощью пантографической стрелы по мере обработки очередной части вагона в пределах рабочей зоны робота.

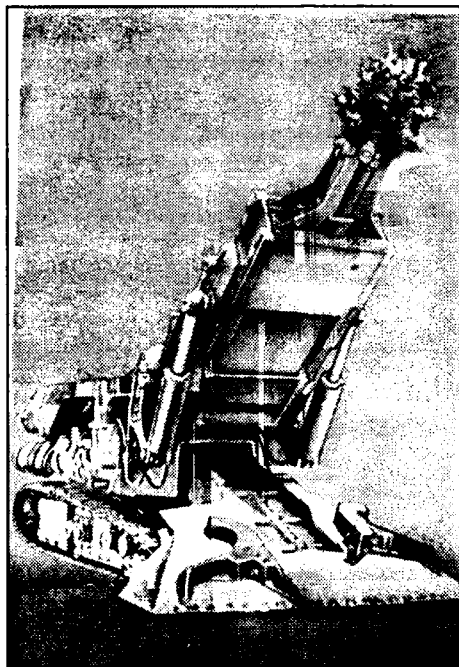


Рис. 17.1. Самоходный робототехнический проходческий комбайн

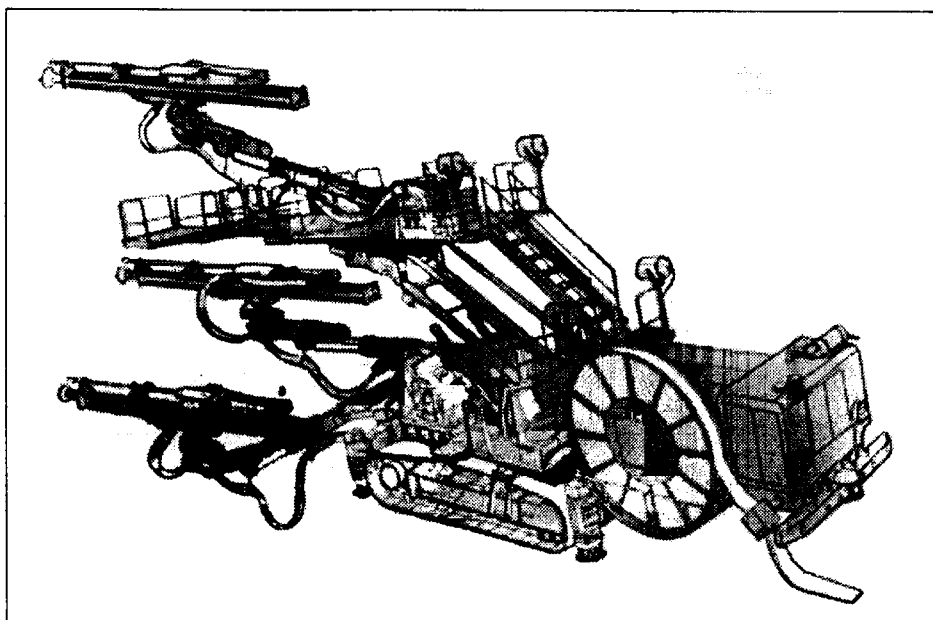


Рис. 17.2. Робот для бурения шурфов (робот-бурильщик)



Рис. 17.3. Робот Топ Тес 5500 для очистки разливочных ковшей
(Top Tec Spezial-maschinen, Германия)



Рис. 17.4. Многооперационный мобильный лесосечный робот Hazvester
(Pluster Oy, США)

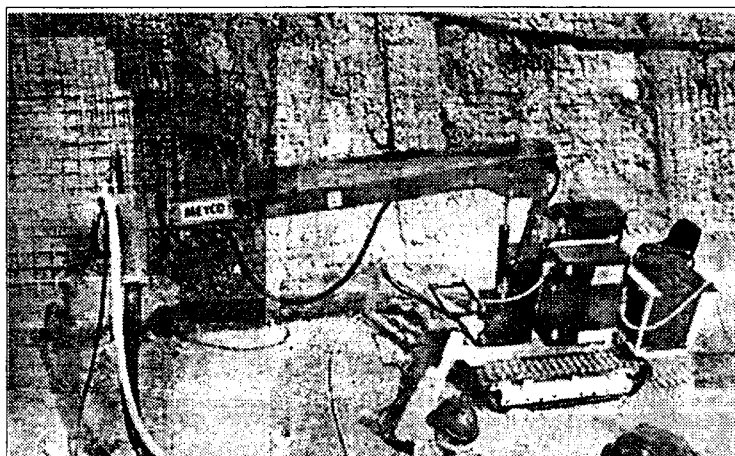


Рис. 17.5. Телеуправляемый мобильный робот-цементукладчик MEYCO (MEYCO Equipment, США)

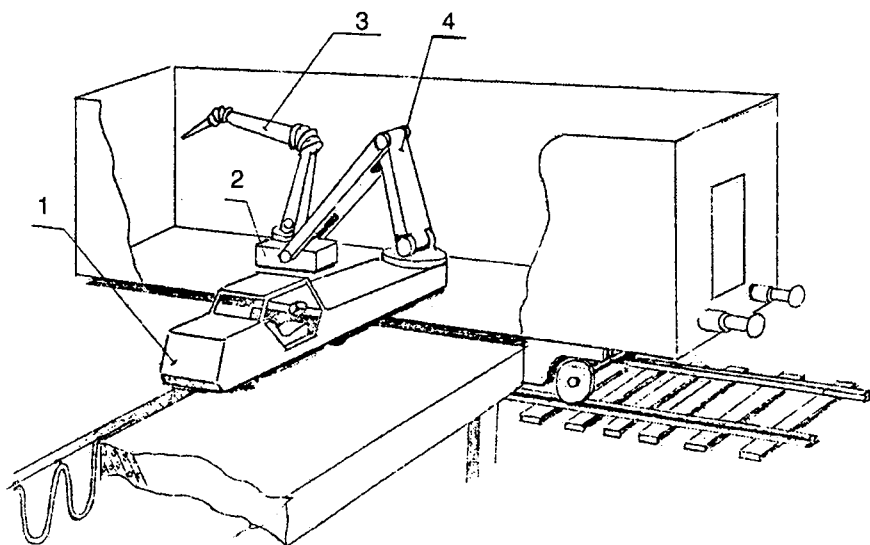


Рис. 17.6. Робототехнический комплекс для химической обработки железнодорожных вагонов: 1 — тележка с оператором; 2 — подвижное основание; 3 — промышленный робот; 4 — пантографическая стрела

Быстро расширяется применение средств робототехники в легкой и пищевой промышленности. На швейных фабриках роботы осуществляют раскрой тканей и обработку деталей одежды. Роботы используются для укладки в ящики и упаковки сахара-рафинада, хлебобулочных изделий, изделий парфюмерии, для раскладки конфет в коробки и т. д.

17.2. Робототехника в непромышленных отраслях

В конце табл. 17.1 приведены примеры использования робототехники в некоторых непромышленных отраслях. Широкие возможности для комплексной автоматизации и роботизации открывает робототехника в сельском хозяйстве. Основные особенности применения здесь средств робототехники заключаются в большой территориальной протяженности и разобщенности предприятий, сезонности работ, сильной зависимости от погодно-климатических условий, в непосредственном контакте с животными и растительными организмами, имеющими большую разбросанность характеристик и специфические требования к взаимодействию с ними.

Одна из важных задач в полеводстве — создание роботов для вождения тракторов, комбайнов и других агрегатов с высвобождением работников самой массовой здесь профессии — трактористов и водителей. Роботы-трактористы должны быть приспособлены для замены тракториста на его стандартном рабочем месте. Это позволит оперативно использовать такие роботы в серийных машинно-тракторных агрегатах, заменять трактористов при выполнении работ особо опасных (внесения ядохимикатов и т. п.) или утомительных (вождение культиваторов и прореживателей строго по рядкам растений и т. п.), осуществлять групповое вождение тракторов и других машин с роботами-водителями за трактором-лидером, ведомым трактористом. Замена трактористов роботами позволит повысить производительность агрегатов, сменность, ритмичность и качество работы, снизить расход топлива.

Одна из наиболее трудоемких отраслей сельскохозяйственного производства — овощеводство и картофелеводство. Производительность труда на ряде операций здесь ограничена физическими возможностями человека. Например, для укладки рассады в высаживающий аппарат требуется несколько сажальщиц на каждой рассадочной машине, которые должны работать в ритме примерно одна операция в секунду в условиях тряски, пыли, при различной погоде.

В теплицах применение мобильных роботов позволяет комплексно автоматизировать большой круг работ по подготовке почвы, высеву семян, опрыскиванию химикатами, сбору готовой продукции (рассады, овощей, фруктов), ее сортировке и укладке в тару.

На рис. 17.7 показан образец робота для сбора ягод.

Аналогичные задачи необходимо решать на стационарных пунктах послеуборочной обработки овощей и фруктов, включая их сортировку, отделение примесей и некондиционных экземпляров.

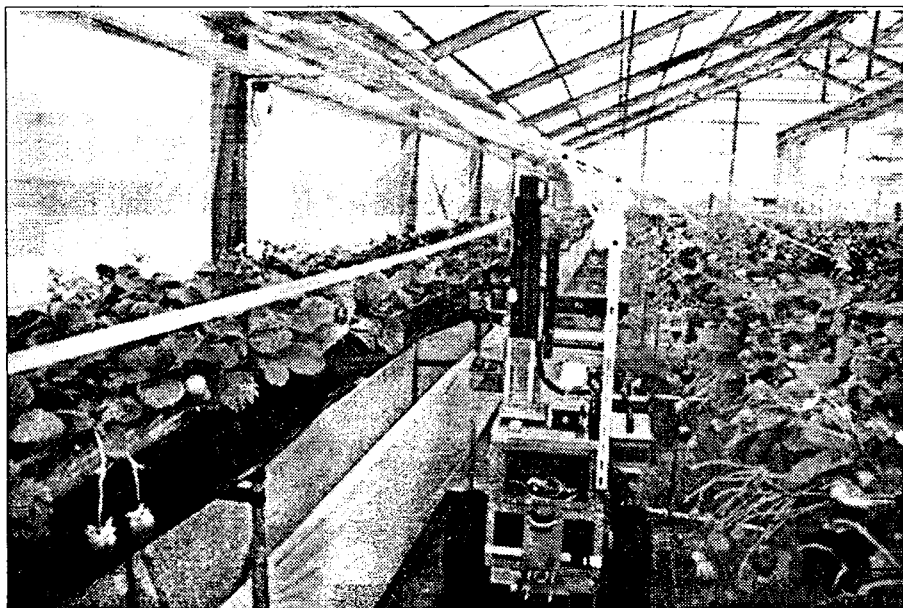


Рис. 17.7. Робот для сбора ягод (Romobility Youto, Япония)

В животноводстве и птицеводстве требуются, в частности, роботы для выполнения следующих работ:

- ☐ основные технологические операции: дозированная раздача кормов, разбрасывание подстилки, уборка навоза, дезинфекция помещений, взвешивание животных;
- ☐ механизированное доение коров;
- ☐ дефектоскопия и сортировка яиц в неорганизованных потоках с последующей укладкой в тару.

Большие перспективы имеет робототехника в медицине, в том числе в хирургии, протезировании, для реабилитации и обслуживания больных и инвалидов. На основе достижений робототехники создаются все более совершенные искусственные конечности — протезы рук и ног, имеющие приводы, встроенные микропроцессорные устройства управления и биологические обратные связи. Созданы искусственные скелеты с приводами, так называемые экзоскелеты (экзо означает "внешний"), для парализованных людей (см. рис. 1.10).

На рис. 17.8 приведен пример хирургического комплекса с четырьмя манипуляторами, управляемыми хирургом с помощью задающих рукояток.

На рис. 17.9 показан медицинский робототехнический комплекс для выправления переломов.

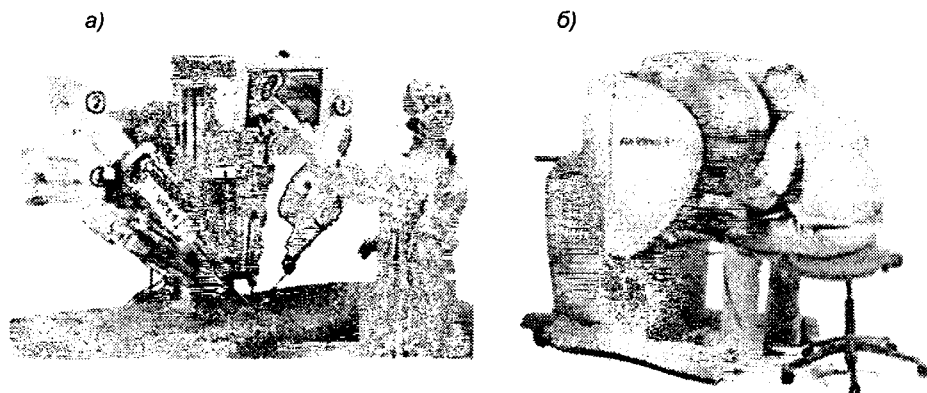


Рис. 17.8. Медицинский робот da Vinci: а — манипуляционная система; б — оператор за пультом управления (Intuitive Surgical, США)

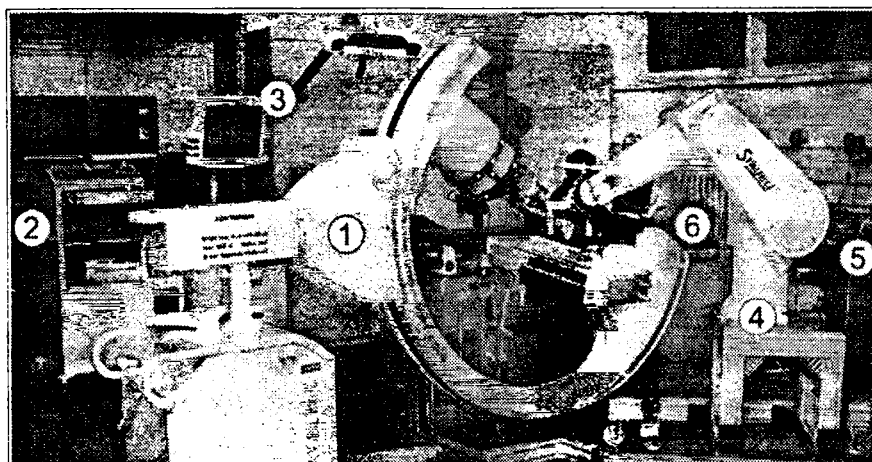


Рис. 17.9. Медицинский робототехнический комплекс 3DOF:
1 — рентгеновский аппарат; 2 — медицинский пульт; 3 — телевизионная система;
4 — манипулятор; 5 — устройство управления; 6 — пульт оператора с задающей рукояткой
с отражением усилия (Technical University Braunschweig, Германия)

Быстро развивается новое направление применения роботов — сервисные роботы для обслуживания больных, инвалидов, детей и для использования в домашнем хозяйстве по уборке помещений, работе на кухне, охране квартиры, выполнению функций швейцара, обслуживанию телефона, радио- и телевизионной аппаратуры и т. п. Такие роботы имеют техническое зрение, обладают слухом, дистанционными и тактильными датчиками, могут вести диалог с человеком в объеме сотен фраз, снабжены системами радиоуправления и передвижения. На рис. 17.10 показан пример робота-игрушки PaPeRo.

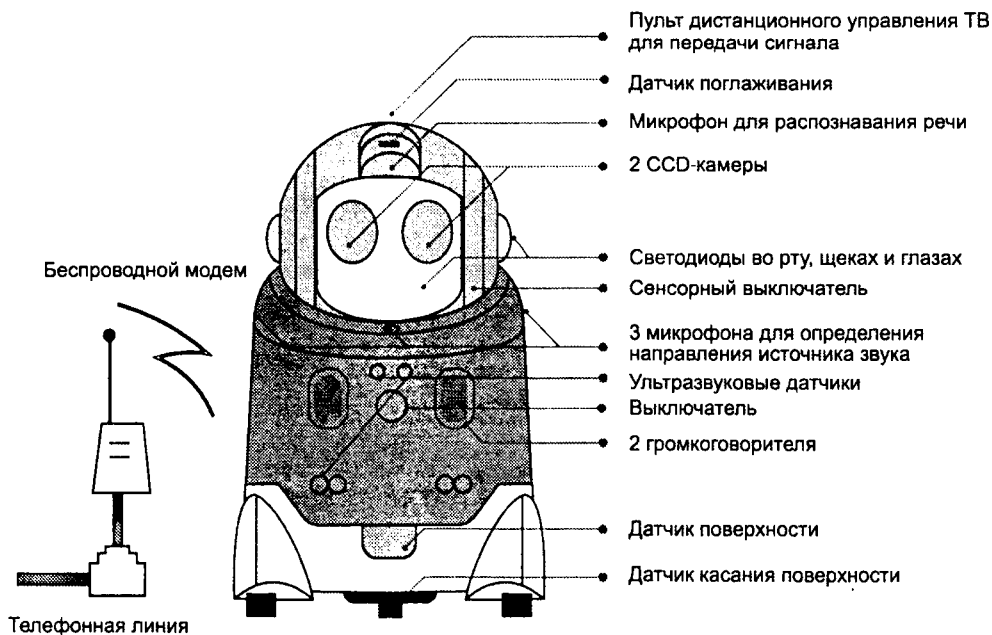


Рис. 17.10. Робот-игрушка PaPeRo (Япония)

Робототехника в немашиностроительных и непромышленных отраслях, как уже отмечено, развивается сегодня, прежде всего, на базе опыта, накопленного в машиностроении, и в той же последовательности: изучение потребностей и определение технических требований к роботам, создание и отработка типовых роботизированных технологических ячеек, создание на их основе крупных базовых комплексов и, наконец, тиражирование последних в рамках отраслей.

ГЛАВА 18

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

18.1. Экстремальная робототехника в промышленности

Одно из назначений робототехники — выполнение различного рода работ в экстремальных внешних условиях либо опасных и вредных для человека, либо вообще полностью исключающих его присутствие. Соответствующий раздел робототехники получил наименование "экстремальная робототехника". Под экстремальными условиями понимаются как аварийные ситуации, включая стихийные бедствия, так и штатные экстремальные ситуации, определяемые технологией производства. По мере интенсификации производства удельный вес и тех и других неуклонно растет. Это относится, в частности, к атомной энергетике и промышленности, химической, металлургической, горнодобывающей отраслям промышленности, подводным работам, освоению космоса, военному делу.

Экстремальные условия определяются прежде всего внешними условиями работы (радиация, сильные электромагнитные поля, экстремальные значения температуры, давления и т. д.). Помимо внешних условий экстремальные ситуации определяются и подлежащими выполнению операциями. В табл. 18.1 приведен примерный перечень подобных операций. Как следует из этого перечня, основным типом технических систем, требующихся для выполнения перечисленных операций, являются робототехнические системы (РТС), благодаря характерной для них многофункциональности и гибкости, позволяющих оперативно выполнять различные технологические операции. Кроме них для выполнения отдельных типовых технологических операций требуется довольно широкая номенклатура специальных технологических систем, с которыми РТС должны взаимодействовать. Примерами таких специальных технических систем могут служить строительные, строительно-дорожные, транспортные, погрузоразгрузочные машины — экскаваторы, бульдозеры,

краны и т. д., но в специальном исполнении, предназначенном для работы в экстремальных внешних условиях.

Наиболее важными характеристиками РТС для рассматриваемой области применения являются способы управления, перемещения и энергопитания. Основным способом управления такими техническими системами является комбинация дистанционного автоматизированного управления со стороны человека-оператора и местного автоматического управления. Перемещение к месту работы может обеспечиваться специальными транспортными средствами (краны, вертолеты и т. п.) или собственной системой передвижения (мобильные РТС). Энергопитание может быть автономным, кабельным или комбинированным.

Таблица 18.1. Примерный перечень работ и входящих в них технологических операций в экстремальных условиях

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции
1.	Инспекция	Визуальный контроль, определение физического состояния местности, объектов, оборудования (с земли, с воздуха, в воде)
		Радиационный контроль на местности, в помещениях
		Определение состава атмосферы, воды, земляного покрытия
		Визуальный контроль труднодоступных помещений
		Снятие показаний контрольно-измерительной аппаратуры
		Определение положения показывающих и исполнительных органов, вентилях, тумблеров
		Выявление мест утечек в трубопроводах и оборудовании
2.	Погрузоразгрузочные и транспортные работы	Доставка различных технических средств к местам чрезвычайных ситуаций
		Расчистка проходов, устройство транспортных путей (проездов, переправ и т. п.)
		Разборка завалов, укрепление или обрушение неустойчивых конструкций
		Транспортировка материалов, инструмента, емкостей и других объектов

Таблица 18.1 (продолжение)

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции
		Сбор и транспортировка опасных отходов
		Удаление опасных предметов (взрывных устройств, радиоактивных источников и т. п.)
		Создание дамб и заградительных полос
3.	Манипуляционные работы	Монтаж и демонтаж оборудования и конструкций
		Сборка и разборка соединений
		Нанесение и удаление покрытий
		Бандажирование течей на трубопроводах, замена прокладок в уплотнительных соединениях
		Работа со взрывчатыми, радиоактивными и другими опасными материалами (кантование, укладка, пересыпание, уплотнение и др.)
		Сбор и удаление рассыпных материалов
		Установка и снятие домкратов, опор и растяжек
		Сварка и резка труб, металлоконструкций
		Сверление и фрезерование
		Бурение
		Резка металлических, бетонных, железобетонных, деревянных конструкций
		Дробление обломков строительных конструкций
		Открытие дверей, люков, задвижек
4.	Очистка	Дезактивация местности, строений, помещений, конструкций и оборудования
		Очистка площадок
		Откачка воды из затопленных помещений
5.	Строительно-восстановительные работы	Организация энергоснабжения
		Обеспечение средствами связи
		Восстановление транспортных путей (шоссейных дорог, железнодорожных путей и аэродромов)
6.	Пожаротушение	Разведка очагов пожара
		Локализация и тушение пожаров

Таблица 18.1 (окончание)

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции
7.	Спасение людей	Поиск людей в местах их блокировки
		Эвакуация людей из мест чрезвычайных ситуаций

По характеру выполняемых операций все РТС можно объединить в 2 группы: инспекционные и технологические. *Инспекционные* системы (разведчики) часто снабжаются манипуляторами. Они предназначаются для расчистки проходов, взятия проб и взятия отдельных объектов, выполнения различных операций с органами управления основного технологического и другого оборудования и отдельных технологических операций с помощью сменного инструмента. *Технологические* РТС предназначены для выполнения различных технологических операций обычно с помощью сменных рабочих органов, включая укрепленные на шасси бульдозерные отвалы, грейферы, сварочные аппараты и т. п.

Основная тенденция развития рассматриваемой техники — создание автономных и телеуправляемых мобильных РТС с развитой сенсорикой, адаптивным и интеллектуальным управлением. Работы в этой области ведутся крупнейшими машиностроительными фирмами, включая Джeneral Электрик, Вестингауз, Мартин Мариетта, Катерпиллер, Джeneral Дайнамикс, Сименс, Мицубиси. Основной формой организации этих работ являются государственные (США, Япония, Франция, Англия) и международные программы и проекты.

На рис. 18.1 показан один из инспекционных мобильных роботов, нашедших применение на работах при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС [1].

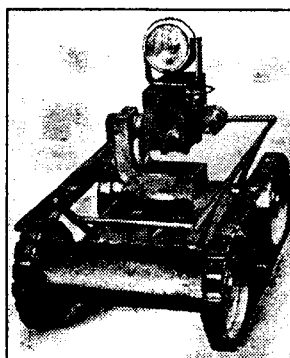


Рис. 18.1. Робот-разведчик РР-Г1 (ЦНИИ РТК, Россия)

На рис. 18.2 приведен мобильный робот Антитеррорист, предназначенный для поиска и идентификации опасных предметов. Показано, как робот, обнаружив предмет в виде портфеля, осуществляет его рентгеновское просвечивание для определения содержимого.

Решение проблемы создания РТС для экстремальных условий связано со следующими особенностями:

- ☐ сложность (экстремальность) внешних условий, зачастую находящихся на пределе возможностей современной техники;
- ☐ сложность, многообразие, нечеткость (изменчивость) подлежащих выполнению функций, приводящие к большой номенклатуре требующихся технических средств при, как правило, единичном характере потребностей в этой технике;
- ☐ межотраслевой характер проблемы, как с точки зрения потребителей, так и производителей требуемых технических средств.

С учетом этих особенностей в основу проектирования средств экстремальной робототехники должна быть положена функциональная и конструктивная унификация технических средств на основе их модульного построения, рассмотренного в главе 13 (параграф 13.2).

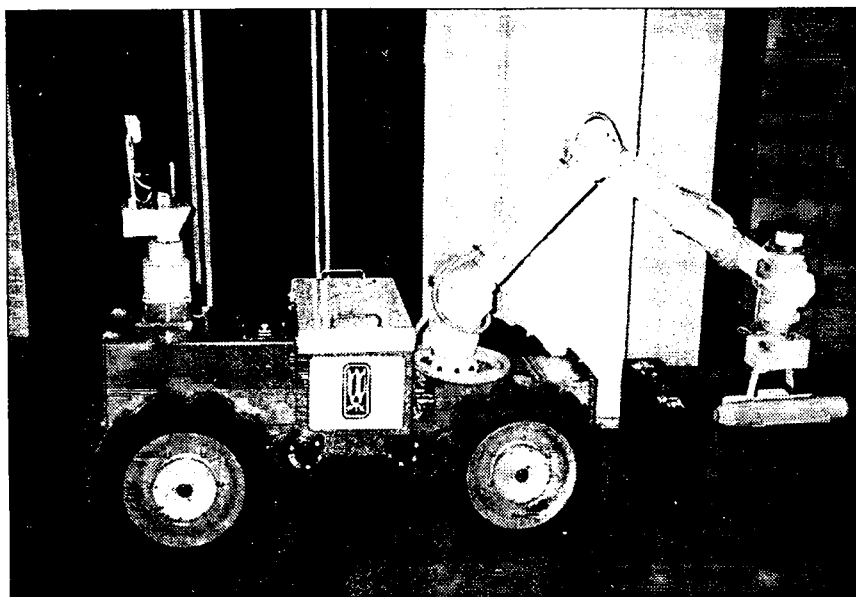


Рис. 18.2. Робот Антитеррорист (ЦНИИ РТК, Россия)

18.2. Космическая робототехника

В космонавтике робототехника и, прежде всего, манипуляторы и мобильные роботы предназначены для выполнения различных манипуляционных транспортных операций, включая техническое обслуживание космических аппаратов и космонавтов, замену последних на отдельных технологических операциях и выполнение операций, недоступных или опасных для космонавтов, а также обследование и мониторинг внешней среды. Эффективность замены человека средствами робототехники состоит, кроме того, и в исключении эффекта "человеческого фактора".

Объектами применения космической робототехники являются:

- ☐ космические аппараты в околоземном пространстве, на околоземных орбитах и в межорбитальных полетах;
- ☐ свободно летающие роботы в открытом космосе (обследование космического пространства и отдельных объектов, их техническое обслуживание, сборка габаритных конструкций и т. п.);
- ☐ поверхность космических тел, включая Луну, другие планеты и т. д.

Конечные цели применения робототехники в космосе:

- ☐ расширение функциональных возможностей космических аппаратов;
- ☐ высвобождение космонавтов от выполнения опасных и утомительных операций;
- ☐ повышение надежности и ресурса космических аппаратов.

В мире разработки систем космической робототехники ведутся в основном в США, Канаде, европейских странах, Японии. Наиболее важной разработкой, которая продемонстрировала высокую эффективность этой техники в условиях космоса, является канадский манипулятор на американском корабле Шаттл (рис. 18.3). На американском сегменте МКС вводится в эксплуатацию тоже канадская манипуляционная система Dextre, предназначенная для работы на поверхности станции (рис. 18.4).

Европейское космическое агентство завершает разработку трехрукого робота Eurobot (рис. 18.5) для помощи космонавтам, в том числе в открытом космосе. В США разрабатываются робот Robonaut, снабженный манипуляторами, способными выполнять повышенной сложности и точности операции, летающий робот для обслуживания МКС и шестиногий напланетный транспортный робот Spider Nant.

В Японии наряду с манипулятором на японском модуле МКС ведутся разработки робототехнических систем для технического обслуживания космических аппаратов, а также перспективных американских ядерных энергоустановок на Луне. Разворачиваются исследования и разработки по космической робототехнике в Китае.

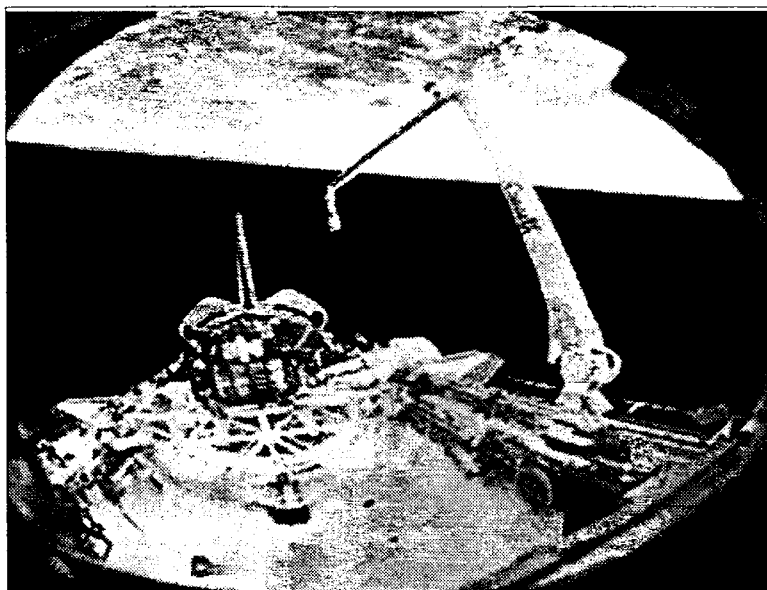


Рис. 18.3. Манипулятор Canadarm корабля Space Shuttle (MD Robotics, Канада)

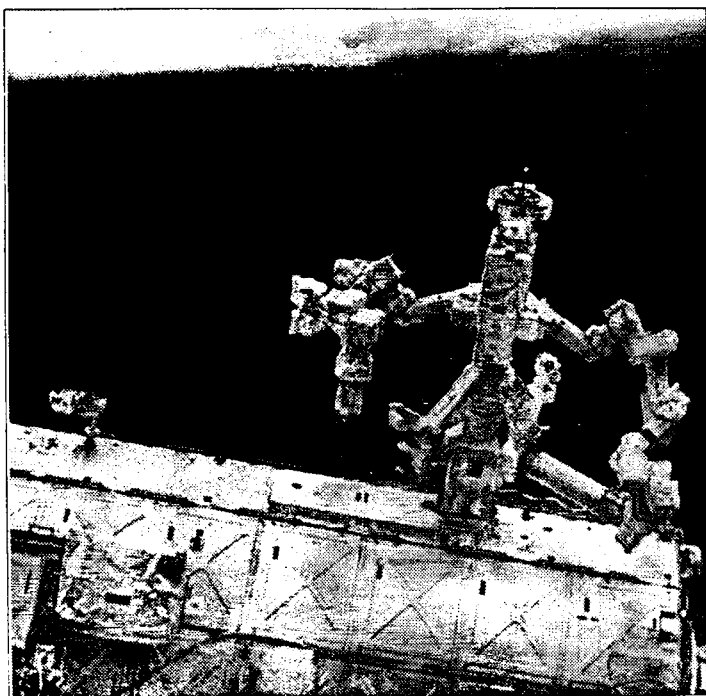


Рис. 18.4. Манипулятор Dextre (MD Robotics, Канада)

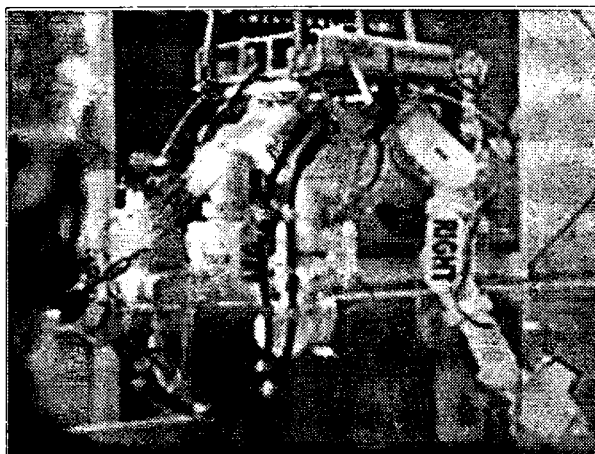


Рис. 18.5. Робот Eurobot (Европейское космическое агентство)

Среди отечественных разработок наиболее крупной является система бортовых манипуляторов для отечественного многоразового корабля Буран (рис. 18.6).

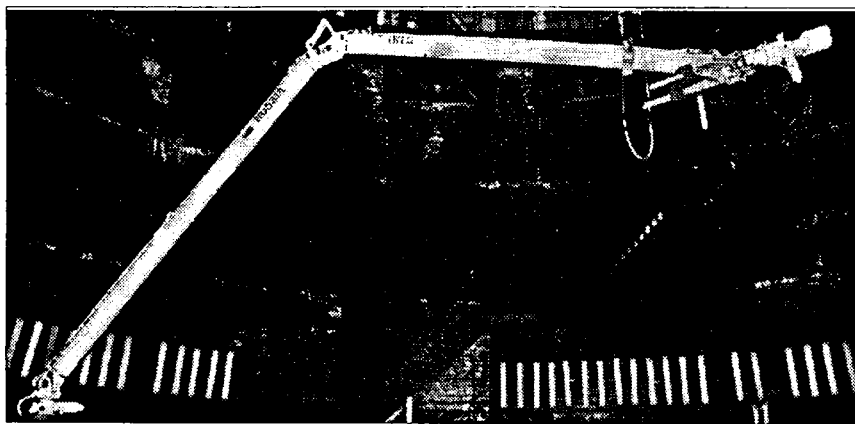


Рис. 18.6. Манипулятор корабля Буран (ЦНИИ РТК, Россия)

На рис. 3.27 был приведен пример одной из последних отечественных разработок космического манипулятора.

Накопленный опыт разработок и эксплуатации средств робототехники в космосе можно обобщить в виде следующих четырех принципов.

1) Унификация функциональных компонентов средств робототехники.

В пределе это реализуется иерархической системой модулей (информационных и силовых). Этот принцип обеспечивает практически неогра-

ниченную номенклатуру создаваемых на его основе технических систем. Вместе с тем, в тех случаях, когда прежде всего необходимо обеспечить предельно высокое качество создаваемой системы по какому-то общему критерию (в космической технике это часто минимум массы, габаритов, энергопотребления), при синтезе такой системы необходимо переходить от модульной декомпозиции соответственно к системному подходу. Переход от модульного построения к такой системной оптимизации необходим при проектировании робототехнических систем длительного достаточно специализированного применения типа манипулятора для корабля Шаттл или планетохода.

2) Реконфигурируемость робототехнических систем, т. е. возможность создания систем переменной структуры.

Возможность такого изменения состава робототехнической системы, в том числе непосредственно в процессе эксплуатации, позволит существенно расширить функциональные возможности таких систем и их эффективность по сравнению с использованием неизбежно предельно ограниченной их номенклатуры. Основа принципа — указанное выше модульное построение. Его реализация означает поставку на борт космического аппарата робототехнических систем в некоторой базовой комплектации и набора функциональных модулей к ней для возможности изменения состава системы, включая реконфигурируемость манипуляционных и локомоционных подсистем, в соответствии с очередной подлежащей выполнению операцией. Это позволяет также осуществлять и указанную в первом принципе возможность ремонта этих систем.

3) Оптимальное сочетание (симбиоз) средств робототехники и человека.

Речь идет о специфическом именно для космонавтики оптимальном взаимодействии человека и техники. Эта специфика определяется следующими обстоятельствами:

- ☐ сложные внешние условия, включая вообще недопустимые для непосредственного присутствия человека;
- ☐ весьма ограниченные возможности выполнения человеком различных рабочих операций, особенно в открытом космосе;
- ☐ повышенная ответственность (важность) подлежащих выполнению операций;
- ☐ определенная удаленность от земных центров управления.

В непилотируемом космосе при наличии человека-оператора в центре управления рассматриваемый принцип наиболее прост и уже достаточно отработан: космические аппараты, в том числе напланетные, должны иметь максимальную автономность функционирования. Это должно обеспечиваться сис-

темой автоматического управления. Роль человека-оператора при этом заключается в выдаче задания (программ), которые предусматривают также остановку их выполнения при возникновении любых нештатных ситуаций. В этих случаях оператор корректирует задание, включая возможность собственного непосредственного управления аппаратом. Особую сложность этот принцип имеет для пилотируемых аппаратов, где необходимо обеспечить оптимальное распределение подлежащих выполнению операций между космонавтом и робототехникой, включая возможность совместной работы, а также управления из наземного центра. При этом приоритет дается средствам робототехники при выполнении операций, которые они могут качественно выполнять в автоматическом режиме или при участии в управлении человека. Однако эти процессы должны находиться под оперативным контролем человека с возможностью блокировки их продолжения при возникновении каких-либо нештатных ситуаций. Таким образом, робототехника позволяет кардинально решать проблему "человеческого фактора" путем такого распределения задач между человеком и техникой, когда человек максимально освобождается от непосредственного выполнения психологически напряженных и утомительных своей монотонностью работ, сохраняя за собой только контроль за их выполнением.

Основные операции, которые на сегодня доступны только космонавту, естественно, он и должен выполнять. Однако в этом случае для исключения эффекта "человеческого фактора" в свою очередь должен быть осуществлен контроль за действиями человека, чтобы исключить его неадекватные ситуации действия, в том числе и с переходом к внешнему управлению из центра управления.

4) Комбинированное управление средствами робототехники — автоматическое и от человека (автоматизированное), в том числе с Земли (с обязательным учетом предыдущего принципа).

В силу большой неопределенности, в том числе внешних условий, для большинства подлежащих выполнению операций, особенно сборочно-монтажных, настроечных, ремонтных и инспекционных, наряду с дальнейшим развитием интеллектуального управления необходимо привлечение неформализуемых способностей человека, т. е. в этих случаях переходить к управлению от человека-оператора.

Таким образом, и в этом принципе совместного функционирования техники и человека приоритет дается последнему. Однако, как и в предыдущем принципе, для исключения влияния эффекта "человеческого фактора" и в системах управления человеком средствами робототехники должна быть предусмотрена блокировка неадекватных действий человека-оператора — автоматическая или, если это возможно, из центра управления.

Перечисленные принципы находятся в разной стадии реализации. В своей совокупности они определяют направления и перспективы развития космической робототехники.

18.3. Подводные роботы

Исследование и освоение глубин океана и морского дна — еще одна важная сфера экстремальной робототехники, перспективность которой аналогично космосу связана прежде всего с тяжелыми и опасными для человека внешними условиями. Следствием последних является низкая эффективность работы водолазов. Назначение подводных роботов аналогично назначению роботов космических.

В настоящее время в мире создано около тысячи подводных роботов — от микророботов с массой менее 1 кг до больших — более 10 00 кг. По назначению их можно разделить на следующие группы:

- ☐ информационные роботы для исследования океана, мониторинга, поиска затонувших судов и других объектов;
- ☐ технологические роботы для выполнения различных технологических силовых операций по обслуживанию подводных сооружений (буровых скважин, трубопроводов, кабелей), строительно-монтажные работы, бурильные работы, очистка и окраска подводной части кораблей;
- ☐ спасательные работы;
- ☐ военные и военно-технические роботы (минирование и разминирование, поиск и извлечение неразорвавшихся торпед, бомб, боевое охранение акваторий, вооруженная борьба с объектами противника и т. д.).

Подводные роботы делятся на *свободно плавающие, привязные и донные*. Они могут быть обитаемыми и без операторов на борту. Привязные роботы соединены кабель-тросом с кораблем. Через кабель осуществляется энергопитание и двусторонняя связь. Один из первых отечественных роботов-геологов этого типа Манта был показан на рис. 1.11. Робот снабжен двумя гидравлическими манипуляторами грузоподъемностью 50 кг с 7 степенями подвижности. На рис. 18.7 приведена структурная схема системы управления роботов этого типа.

В состав схемы входят пульт управления с устройством целеуказания на телеэкране и бортовой вычислитель на базе ЭВМ. Бортовой вычислитель обеспечивает автономное выполнение роботом следующих директив оператора в супервизорном режиме управления:

- ☐ взять объект, указанный оператором на телеэкране;
- ☐ перенести этот объект ближе к телекамере, положить в бункер или в любую заданную на телеэкране точку пространства;



Рис. 18.7. Структурная схема системы управления подводного робота типа Манта

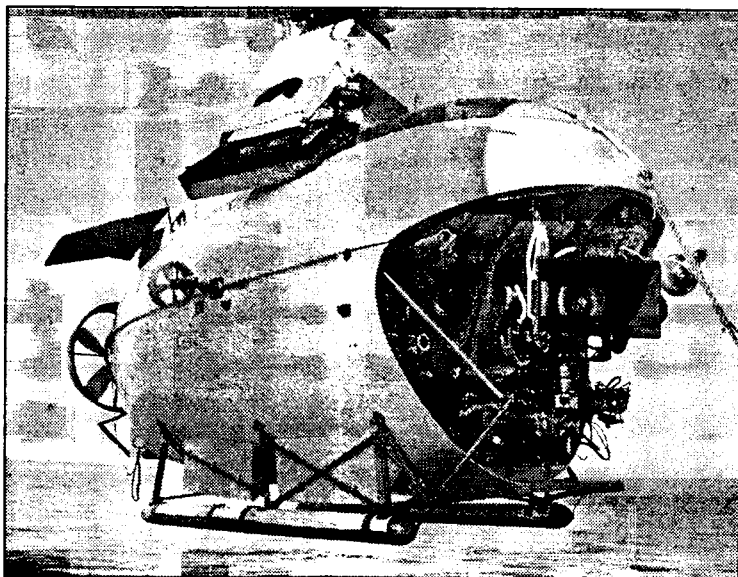


Рис. 18.8. Подводный робот Мир (Институт океанологии, Россия)

- ☐ искать объект вслепую (на ощупь) в заданном квадрате (в случае плохой видимости из-за замутнения воды и других причин).

В этом режиме обеспечивается автоматический обход манипулятором встречающихся препятствий.

На рис. 18.8 показан современный отечественный обитаемый исследовательский подводный робот Мир с глубиной погружения до 6000 м, снабженный двумя манипуляторами.

18.4. Военная робототехника

Важным разделом экстремальной робототехники является робототехника для вооруженных сил. В нее входят следующие по назначению типы средств робототехники:

- ☐ боевые;
- ☐ боевого обеспечения;
- ☐ специально-технического обеспечения;
- ☐ тылового обеспечения.

Основными специфическими видами средств робототехники для вооруженных сил являются:

- ☐ мобильные роботы наземного, воздушного и водного базирования;
- ☐ роботы-водители и роботы-пилоты для различных видов боевых и транспортных машин;
- ☐ роботы и другие средства робототехники для обслуживания вооружений и военной техники.

На рис. 18.9 показан телеуправляемый мобильный робот-разведчик на трансформируемом шасси, позволяющем преодолевать высокие бордюры и подниматься по лестницам. Робот снабжен системой технического зрения в видимом и инфракрасном спектрах, микрофоном, светодиодным прожектором.

На рис. 18.10 показан боевой автономный мобильный робот модульной конструкции с оперативно сменяемым оснащением — от средств поражения (пулемет, гранатомет) до манипулятора для обезвреживания мин.

В следующем параграфе 18.5 на рис. 18.11 и 18.12 показаны примеры боевых микророботов.

Основными факторами эффективности применения робототехники в вооруженных силах являются:

- ☐ применяемость в экстремальных условиях, не допускающих участие людского персонала;

- ❑ повышение быстродействия, точности и стабильности основных характеристик вооружения и военной техники;
- ❑ исключение ошибок операторов (от усталости, влияния неблагоприятных факторов внешней среды, стрессовых ситуаций, перерывов в тренировках и т. п.);

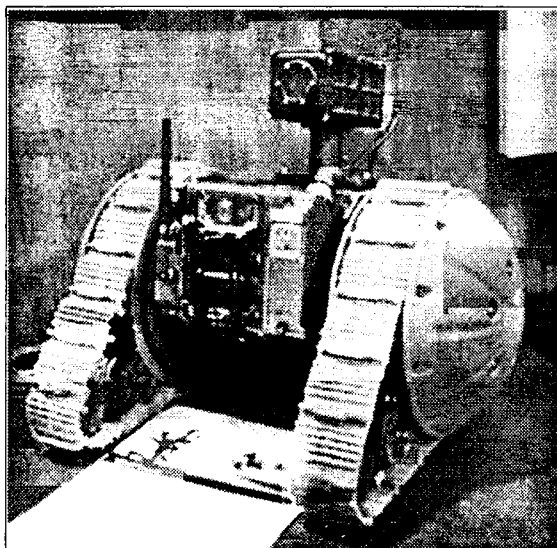


Рис. 18.9. Робот-разведчик Viper (Elbit Systems, Израиль)

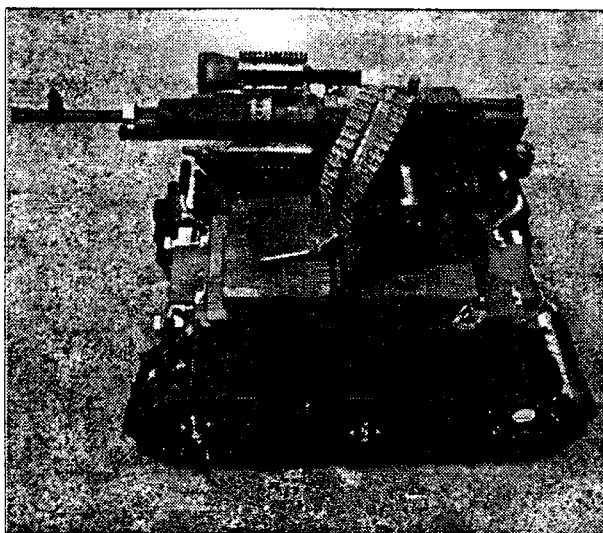


Рис. 18.10. Боевой робот MAARS (Foster-Miller, США)

- ☐ сокращение численности личного состава и выведения его из зон, опасных для жизни и здоровья;
- ☐ снижение потерь личного состава;
- ☐ упрощение собственно вооружения и военной техники;
- ☐ меньшая их стоимость.

Важным условием повышения эффективности военной робототехники является комплексная унификация номенклатуры требуемых средств робототехники и их основных комплектующих систем.

Хотя на вооружении армий в мире находятся десятки образцов военных робототехнических систем. Широкому применению робототехники в вооруженных силах препятствуют следующие недостатки и ограниченные возможности современной робототехники:

- ☐ исполнительные системы и, прежде всего, манипуляционные имеют неудовлетворительные массогабаритные параметры, во много раз уступающие аналогичным параметрам человека;
- ☐ неудовлетворительные интеллектуальные возможности информационных и управляющих систем.

С учетом последних соображений первоочередными направлениями применения робототехники в вооруженных силах являются:

- ☐ создание мобильных роботов-разведчиков, саперов, охранников и тому подобных легких роботов;
- ☐ создание стационарных роботов для обслуживания вооружения и военной техники;
- ☐ применение средств робототехники для обеспечения безэкипажного функционирования традиционных подвижных средств военной техники.

На первом этапе этой работы будут созданы роботы в значительной степени с дистанционным управлением с последующим наращиванием их интеллекта и соответственно количества автоматически выполняемых операций.

Развитие интеллектуальной робототехники позволит повысить эффективность вооружений и военной техники не менее чем в 2—3 раза.

18.5. Микроробототехника

В главе 1 было отмечено, что микроробототехника — это новое быстро развивающееся направление в робототехнике, возникшее в русле общей тенденции миниатюризации техники на базе новых трехмерных технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС). В параграфе 4.8 были рассмотрены выполненные на основе этих технологий микроприводы. Одновременно

развивалась и микросенсорика. Были созданы измерители перемещения, скорости, положения в пространстве и т. д. с размерами в единицы миллиметров. Это позволило создать первые микроманипуляторы и роботы соответствующих размеров.

Быстро развивается микроробототехника военного назначения: микророботы — разведчики, диверсанты и т. п. К их специфическим достоинствам относятся трудная обнаруживаемость и возможность использования большими группами. На рис. 18.11 и 18.12 показаны образцы боевых микророботов.

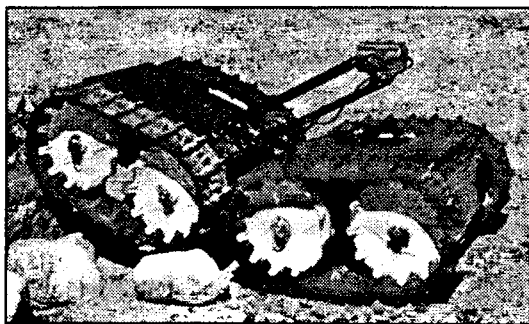


Рис. 18.11. Дистанционно управляемый микроробот-разведчик Sand Dragon (США)

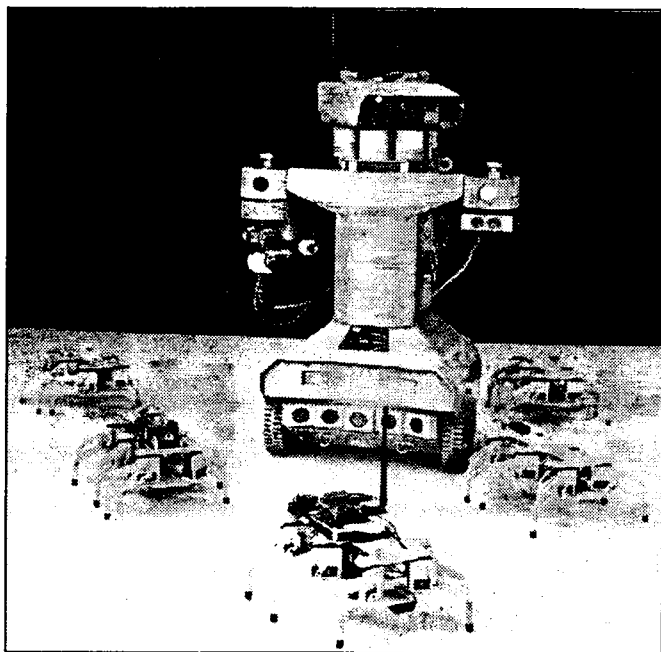


Рис. 18.12. Группа шагающих микророботов-охранников во главе с мини-роботом (Spawer System Center, США)

Наряду с термином *микроробот* существует термин *мини-робот*. Хотя четкой границы между ними нет, принято считать, что мини-роботы — это роботы с габаритными размерами в сотни, а микророботы — в десятки миллиметров. Меньшие размеры будут иметь нанороботы будущего, которые, по-видимому, определяют заключительный, физически еще реализуемый участок размерного ряда роботов. (Об этом см. в заключительной главе 20.)

Особый класс микророботов составляют *биороботы*. Это живые организмы, в основном, мелкие животные, управляемые человеком или автоматически путем воздействия на их нервную систему электрическими сигналами через электроды, вживленные в отделы мозга, ответственные за локомоторные и другие подлежащие управлению функции. Типичные назначения таких биороботов — радиационная и химическая разведка, поиск взрывчатых веществ и людей под развалинами. Для этого они оснащаются дополнительными сенсорными системами, включая микрофоны и системы технического зрения, а также радио-приемопередатчиками.

Очевидное основное достоинство биороботов — это возможность целенаправленно длительное время (более месяца) функционировать без воды и пищи, в т. ч. в недоступных для человека местах, используя при этом присущие живым организмам способности к ориентации, навигации, преодоления препятствий и т. п. На рис. 18.13 показан пример биоробота-таракана. Он оборудован процессором, видеокамерой и предназначен для выполнения разведывательных операций.

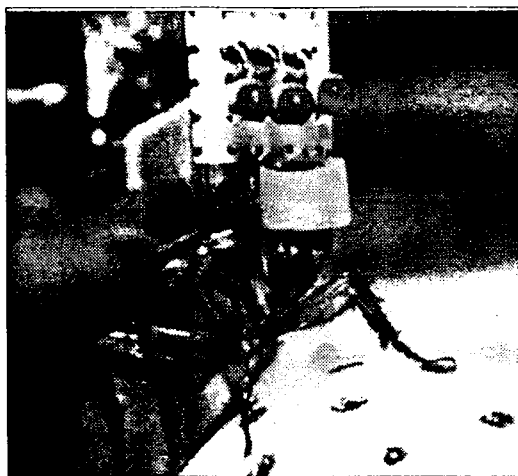


Рис. 18.13. Биоробот-таракан (Tokyo University, Япония)

ГЛАВА 19

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОБОТОТЕХНИКИ

19.1. Социально-экономическая эффективность применения средств робототехники

Рассмотрение вопроса об эффективности и соответственно перспективности какого-либо нового научно-технического направления или нового вида техники необходимо начинать с сопоставления его с основными целями общества, а затем уже переходить к оценке его чисто экономической эффективности. Действительно, могут быть такие научно-технические идеи, которые, давая определенное и даже очень большое повышение эффективности конкретного производства, принципиально несовместимы с общей целью и принципами нашего общественного производства или в чем-то противоречат им.

Например, применение конвейера и некоторых видов полуавтоматического оборудования, повышая производительность, резко ослабляет творческий характер труда. Организация производства на конвейере ведет к такой дифференциации операций, при которой работающие на нем люди выполняют однообразные, монотонные движения фактически без необходимости приложения каких-либо интеллектуальных усилий. Тем не менее дифференциация и упрощение трудовых операций имеют важное положительное следствие: именно они создают предпосылки перехода к полностью автоматическому производству, в том числе с использованием промышленных роботов, что позволяет вообще исключить труд человека при их выполнении.

Итак, рост производительности труда и соответственно расширение объема производимого совокупного продукта в целом ряде случаев ведут к обеднению содержания труда и снижению его престижности. Выход из указанного противоречия заключается в переходе к принципиально новым техническим

решениям, позволяющим высвободить человека от однообразных, физически тяжелых и лишенных интеллектуального содержания операций.

Дальнейший рост производства на основе использования достижений современной науки и техники ограничивается также возможностями человека. Это касается увеличения интенсивности технологических процессов, возрастания числа процессов, протекающих в агрессивных и вредных для человека средах (химия, атомная энергетика и др.). Для того чтобы снять подобные ограничения, опять-таки, необходимо передать часть трудовых операций новым техническим средствам. Не менее существенные ограничения возникают и в отношении управления качеством продукции. Практика показывает, что в производстве с преобладанием ручного труда практически невозможно гарантировать стабильно высокое качество продукции.

Робототехника относится именно к тем научно-техническим направлениям, с помощью которых могут быть преодолены указанные объективные противоречия в развитии современного производства между растущей специализацией трудовых операций, их интенсификацией и необходимостью усиления содержательности труда. Робототехника, избавляя человека от тяжелого и опасного труда, с другой стороны освобождает производство от непосредственного участия в нем людей и тем самым снимает связанные с их участием ограничения, препятствующие дальнейшей интенсификации производственных процессов и внедрения новых технологий, принципиально не допускающих присутствия людей.

Рассмотрим конкретные особенности эффективности применения средств робототехники в производстве. Анализ результатов применения роботов в различных отраслях промышленности и типах производств подтверждает, что они могут эффективно использоваться в условиях как мелкосерийного, так и массового производства. В массовом и крупносерийном производстве с быстрой сменой выпускаемой продукции (автомобилестроение, радиопромышленность, производство бытовых приборов и т. п.) перспективно применение роботов для обслуживания агрегатных станков и переналаживаемых автоматических линий на операциях загрузки-выгрузки на начальных и конечных позициях линий, для внутрицехового транспортирования. Использование роботов позволяет осуществлять комплектацию и запуск таких линий в более короткие сроки. Роботы можно эффективно применять, в частности, для замены специального вспомогательного оборудования на отдельных операциях в автоматических технологических комплексах в период модернизации или замены этого оборудования. В этом случае отпадает необходимость останавливать комплекс на длительный период, а затраты на переоснащение роботов оказываются значительно ниже потерь вследствие простоя комплекса в течение всего периода модернизации или замены специализированного

вспомогательного оборудования на конкретных операциях. В серийном и мелкосерийном производстве наиболее перспективным является применение роботов в сочетании с оборудованием с ЧПУ. Это позволяет, в частности, полностью решить на базе групповой организации производства проблему изготовления изделий малыми партиями.

В любой области применения роботов их необходимо рассматривать как компонент всего производственного комплекса, включающего другое технологическое оборудование, объединенного общей системой управления. Использование роботов оказывает существенное влияние на такие важные экономические характеристики, как производительность труда, объем производства продукции, себестоимость, рентабельность, фондоотдача.

Рост производительности труда обеспечивается, с одной стороны, увеличением объема производства, а с другой — сокращением численности производственных рабочих. Рост объема производства происходит вследствие улучшения использования оборудования, повышения его производительности и снижения брака. При этом повышение эффективности использования оборудования достигается за счет как факторов *экстенсивного*, так и *интенсивного* характера. Факторы интенсивного характера предусматривают улучшение использования оборудования в единицу времени вследствие сокращения трудоемкости вспомогательных операций (загрузки-выгрузки деталей, транспортировки и т. п.). Повышение экстенсивного показателя использования оборудования обусловлено увеличением времени его работы. В условиях роботизации рост эффективности обеспечивается сокращением различного рода потерь рабочего времени и повышением сменности работы оборудования.

Снижение брака продукции является следствием устранения влияния таких индивидуальных и субъективных факторов, как квалификация, опыт, утомляемость работающих и т. п.

В условиях роботизации происходит абсолютное и относительное сокращение численности производственных рабочих. Под относительным сокращением численности понимается возможность повысить объем производства при той же численности производственных рабочих благодаря увеличению годового эффективного фонда времени работы оборудования в результате использования роботов.

Увеличение объема производства в условиях роботизации приводит к снижению себестоимости продукции в результате уменьшения доли накладных расходов на единицу продукции, сокращения непроизводительных расходов, таких как оплата сверхурочных работ и простоев рабочих, снижение потерь от брака, а также удельных затрат на содержание и эксплуатацию оборудования. Снижение себестоимости продукции достигается за счет экономии заработной платы рабочих, высвобождаемых абсолютно и относительно. Эта со-

ставляющая является одной из самых очевидных и значительных при оценке экономической эффективности промышленных роботов. Экономия на заработной плате образуется также вследствие опережающего темпа повышения производительности труда по сравнению с темпом роста заработной платы.

Применение роботов позволяет улучшить использование производственных фондов, которое характеризуется показателями рентабельности и фондоотдачи. При этом рентабельность увеличивается вследствие возрастания общей суммы прибыли, получаемой в результате роста объема производства.

Для оценки экономического эффекта от применения роботов в конкретном технологическом комплексе необходимо провести технико-экономический анализ с учетом технических параметров всего оборудования, входящего в комплекс, основных характеристик и особенностей технологического процесса, частных организационных и технико-экономических показателей, а также социальной значимости роботизации данного процесса. Объектами такого анализа должны быть:

- ☐ оборудование, на котором выполняются операции технологического процесса;
- ☐ роботы;
- ☐ вспомогательное оборудование, которое требуется для эксплуатации комплекса;
- ☐ транспортно-складские системы для материалов, заготовок, готовых изделий, инструмента, оснастки, отходов производства;
- ☐ запас материалов, заготовок, представляющих различного вида заделы, инструмента, технологической оснастки;
- ☐ устройства обеспечения других необходимых условий нормальной эксплуатации комплекса (вентиляционные, защитные и др.);
- ☐ система управления комплексом в целом;
- ☐ производственные площади, занимаемые комплексом.

Все расчеты экономического характера для оценки целесообразности и эффективности применения роботов следует выполнять с учетом перечисленного полного состава объекта исследования. Кроме того, одним из важных факторов, который следует учитывать при экономическом обосновании роботизации, является надежность. Недостаточная надежность технических устройств комплекса соответственно снижает эффективность роботизации производства. В связи с этим возникает необходимость в исследовании экономической эффективности различных мероприятий по повышению надежности и выявлению оптимальной в этом отношении структуры комплекса. Например, чем универсальнее робот, тем он сложнее и менее надежен. В то

же время использование в составе технологического комплекса более простых и дешевых, но менее универсальных роботов приводит к необходимости включать в состав комплекса дополнительное специальное оборудование и приспособления, компенсирующие снижение функциональных возможностей роботов. Проектирование и изготовление такого специального оборудования связано с дополнительными затратами, а его размещение приводит, как правило, к увеличению производственных площадей, занимаемых комплексом.

Социальные аспекты роботизации, связанные с улучшением условий труда, ликвидацией тяжелых, опасных и вредных для здоровья видов работ, с повышением общей культуры производства, должны быть количественно оценены и учтены в расчетах экономической эффективности применения роботов. Например, внедрение роботов уменьшает текучесть кадров, что выражается в конкретной экономии расходов на прием-увольнение, учебу и т. п.

Необходимо учитывать и экономический эффект, связанный с тем, что роботизация позволяет уменьшить количество профессиональных заболеваний, снизить травматизм, сократить затраты на лечение и мероприятия по охране труда и технике безопасности. Учет социальных факторов в экономических расчетах позволяет более точно определять области эффективного применения роботов.

Обычно экономическую эффективность применения роботов и основанных на них технологических комплексов оценивают по годовому экономическому эффекту, который представляет собой экономию приведенных годовых затрат, получаемую в результате использования роботов в составе технологического комплекса. Эту экономию определяют из сравнения предлагаемого (нового) варианта с базовым, в качестве которого принимается лучший аналог, который может быть приобретен. Затем по этой величине определяют срок окупаемости затрат.

19.2. Техника безопасности в робототехнике

В проблеме безопасности труда при использовании роботов можно выделить следующие 2 аспекта:

- ☐ применение роботов как средства повышения безопасности производства;
- ☐ обеспечение безопасности при эксплуатации самих роботов.

Первый аспект соответствует одному из первоочередных назначений роботов — избавлению людей от травмоопасного, вредного и тяжелого физического труда. При планировании внедрения роботов в производство такого рода технологические операции получают приоритет и на таких операциях роботы применяются наиболее успешно. В машиностроении к этим операци-

ям относятся, в частности, обслуживание кузнечно-прессового оборудования и металлорежущих станков (особенно при обработке тяжелых заготовок), оборудования в гальваническом и литейном производствах, в производстве изделий из пластмасс, а также такие основные технологические операции, как сварка, окраска, погрузочно-разгрузочные и транспортные работы. В немашиностроительных отраслях такими операциями являются, например, установка крепи в забое, обслуживание отбойных и бурильных агрегатов в горнодобывающей и угольной промышленности, обслуживание оборудования, фасовка продукции во вредной для здоровья атмосфере в химической и нефтехимической промышленности, различные манипуляционные операции в металлургической промышленности, атомной энергетике и других производствах с экстремальными условиями (вредные излучения, взрывоопасность, предельные температуры, загазованность, запыленность и т. п.). В мире накоплен определенный положительный опыт повышения безопасности труда с помощью роботов, прежде всего, в машиностроении (на штамповке, в гальваническом производстве, в производстве пластмассовых изделий, на термообработке, погрузоразгрузочных и транспортно-складских операциях).

Второй отмеченный ранее аспект робототехники с точки зрения безопасности труда — это обеспечение безопасной работы самих роботов, которые при определенных условиях могут представлять собой источник опасности для человека, а также и для работающего с ними оборудования. По данным статистики в Японии, где применение роботов достигло наибольших размеров, почти каждый третий рабочий так или иначе сталкивается с опасностями, создаваемыми роботами. В основном такая опасность вызывается следующими причинами:

- ☐ неисправность собственно роботов из-за нарушения их механической прочности или отказов в системе управления;
- ☐ ошибки программирования и настройки, вызывающие при эксплуатации непредвиденные движения с выходом из огражденной рабочей зоны;
- ☐ потери объекта манипулирования и другие аварийные ситуации из-за превышения допустимых динамических режимов и перегрузок;
- ☐ нарушение персоналом условий эксплуатации робота (вход в рабочую зону, особенно при отключенных средствах безопасности, отсутствие личных средств безопасности, включая каску, превышение допустимой грузоподъемности, несоответствие исполнения робота реальным условиям эксплуатации, другие нарушения технических условий на робот или технологический комплекс, в составе которого он работает);
- ☐ неправильная работа средств безопасности, которыми оборудованы робот и его рабочая зона (устройства блокировки, сигнализации, защитные ограждения и т. п.).

Статистика показывает, что основная часть несчастных случаев связана с нахождением обслуживающего персонала в рабочей зоне при программировании, настройке и ремонте роботов. Несчастные случаи во время работы робота в автоматическом режиме составляют всего единицы процентов.

Мероприятия по обеспечению безопасности роботизированных производств должны быть предусмотрены на всех этапах их создания и эксплуатации, начиная с формулирования технических требований, и регламентированы соответствующими нормативно-техническими документами, а также специальными документами по технике безопасности. Общие требования по безопасности при проектировании и эксплуатации роботов стандартизированы. В этих требованиях, в частности, регламентированы следующие позиции:

- ☐ если при программировании и наладке робота требуется пребывание персонала в его рабочей зоне, то в этих режимах должно быть предусмотрено снижение скорости исполнительных устройств робота до $\sim 0,3$ м/с;
- ☐ пульт управления робота должен выдавать информацию о режиме его работы, срабатывании блокировок и функционировании работающего с ним технологического оборудования, наличии сбоев в работе, начале движения робота.

Регламентированы также требования к предохранительным, блокирующим и защитным устройствам, которыми должны быть оснащены роботы.

Применительно к организации технологических комплексов регламентированы:

- ☐ необходимость комплексной автоматизации всех основных и вспомогательных операций с допустимостью сохранения за оператором в основном только некоторых функций управления и контроля;
- ☐ наличие блокирующих устройств и ограждений, требования к ним;
- ☐ планировка комплекса с учетом размеров рабочих зон роботов;
- ☐ требования к организации рабочих мест операторов, к пультам управления и расположенным в других местах дополнительным органам аварийного отключения.

Применительно к эксплуатации роботов разработаны:

- ☐ требования, предъявляемые к обслуживающему персоналу, и перечень его обязанностей;
- ☐ инструкции по охране труда.

В обязанности обслуживающего персонала, в частности, входят проверка оборудования и блокировочных устройств перед началом работы, обязательная регистрация в специальном журнале всех неполадок и аварийных ситуаций.

ГЛАВА 20

РОБОТОТЕХНИКА ЗАВТРА

С самого начала в развитии современной робототехники определялись две, правда, сначала довольно слабо связанные цели — *прикладная и фундаментальная*. Прикладная цель была объективно обусловлена развитием современного производства, а именно переходом к комплексной гибкой автоматизации, к гибким автоматизированным производствам. Здесь одной из первоочередных задач стало создание выявленного в ходе этих работ недостающего звена в перечне компонентов таких производств, которое должно заменять человека, выполняющего различные манипуляционные операции — основные технологические и вспомогательные. Из этой задачи сразу же выделилась самостоятельная задача высвобождения людей от опасных и вредных работ. Затем по мере развития робототехники возникла отдельная задача создания средств робототехники, предназначенных для работ, которые принципиально не могут выполняться с помощью или даже просто в присутствии людей (дальний космос, глубины океана, новые интенсивные технологии и т. д.). Возникли экстремальная робототехника, медицинская микроробототехника, биоробототехника, шагающие машины и другие специальные разделы робототехники. Появилось роботостроение с международной кооперацией и специализацией. Постепенно сложились определенные принципы построения, проектирования и применения средств робототехники и основанных на них технических комплексов. Определились области применения и перспективы их расширения, основанные на реальных технических и экономических характеристиках этой техники.

Принципиальный вопрос — по какому пути идти робототехнике — в сторону повышения универсальности роботов или, наоборот, их специализации, разрешился признанием в качестве основного — модульного принципа их построения. Этот принцип позволяет промышленности оперативно поставлять даже в единичных количествах работы, собранные из унифицированных мо-

дулей, для выполнения самых разнообразных технологических операций. Таким образом, заманчивая идея создания сравнительно небольшого семейства универсальных роботов, близких их прототипу — человеку, была заменена идеей универсального набора компонентов роботов — модулей.

Сегодня роботы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, а уровень робототехники является важным показателем научно-технического, промышленного и оборонного потенциалов каждой страны.

Вторая указанная ранее фундаментальная цель робототехники — это экспериментальное изучение и воспроизведение феномена разумного поведения живых существ. В дальнейшем эта проблема привела к появлению самостоятельного научно-технического направления, получившего название "искусственный интеллект". То, что эта проблематика наиболее актуальна именно для робототехники, вытекает из исходной идеи этой отрасли знаний, как альтернативы занятого физическим трудом человека. Первый же опыт создания таких машин показал недостаточность, и даже примитивность современной теории и техники автоматического управления и теории информации по сравнению с задачами, решаемыми человеком при выполнении даже самых простых операций. В связи с этим были развернуты интенсивные экспериментальные исследования с объектами типа "глаз-рука" и различных оцувствленных мобильных объектов, которые продолжают и сегодня. В последнее время к ним добавились исследования группового поведения подобных объектов (мультиагентные системы, игры роботов и т. п.).

Это направление в робототехнике непосредственно соответствует основной идее кибернетики об общности информационно-управляющих процессов в технике и в живой природе. Одна из целей этого направления — воспроизведение процесса эволюции живой природы, поскольку именно робот является технической системой, которая реализует триаду "сенсоры-мозг-активаторы", замкнутую через внешнюю среду. Конечным научно-техническим результатом этих исследований должны стать принципы и методика самоусовершенствования интеллектуальных технических систем типа "робот". Это позволит спустить курок эволюционного совершенствования роботов, пределом для которого, разумеется, не будут интеллектуальные, а затем и креативные способности человека. Конечно, это эмпирика, но она даст результат, гарантированный опытом развития живой природы, эволюционное развитие которой — это тоже эмпирика, метод проб и ошибок.

Однако решить эту проблему в рамках одной робототехники нереально. Здесь необходимо скоординированное взаимодействие многих смежных научно-технических направлений, хотя бы потому, что ее решение требует создания принципиально нового материально-технического обеспечения не только для информационно-управляющих систем (технические нейророботы).

ные структуры и т. д.), но и для остальных компонентов названной ранее триады — исполнительных систем и сенсоров.

Подобно тому как робототехника явилась одной из побудительных причин и полигоном развития работ по проблеме искусственного интеллекта, она же инициировала проблему создания "искусственной мышцы", как проблему создания принципиально новых приводных исполнительных систем по крайней мере на порядок с лучшими массогабаритными характеристиками, чем у подобных систем, основанных на современных приводах. Последние именно более чем на порядок уступают по указанным характеристикам поперечно-полосатым мышцам животных. Речь идет о принципиально новом подходе к построению приводов, также заимствованном у живой природы и основанном на параллельно-последовательной работе сотен и тысяч элементарных *микроактиваторов*. Аналогичная проблема перехода к микромодульному построению стоит и перед сенсорными системами. Ее успешное решение будет иметь революционизирующее значение не только для робототехники, но и для машиностроения в целом.

Что касается собственно робототехники, то, как было отмечено ранее, прикладная робототехника в своем развитии практически быстро исчерпала научный задел, который был предоставлен ей, прежде всего, теорией автоматического управления и информатикой, а также технический задел в виде приводов и систем ЧПУ, заимствованный у станкостроителей. И сегодня дальнейшее развитие практической робототехники почти целиком зависит от успехов в решении перечисленных ранее фундаментальных проблем. Так сомкнулись первоначально почти не связанные два направления развития робототехники — прикладное и фундаментальное.

В начале своего развития робототехника пережила период романтизма, период "бурь и натиска", когда казалось, что еще немного и мы "схватим бога за бороду" — наступит "роботовладельческий" строй. На смену порожденных кибернетикой споров о том, может ли машина мыслить и превзойти в этом человека, разгорелись дискуссии об опасностях, которые могут принести роботы, вплоть до их бунта против человека. Затем пришли зрелость и прозрение: определился целый комплекс серьезнейших научно-технических проблем, которые стоят на пути к царству искусственного разума и роботов. Основные из них были уже названы и, как следует из изложенного, генеральное направление дальнейшего развития робототехники — это прежде всего комплексная миниатюризация компонентов и интеллектуализация в виде распределенного интеллекта, пронизывающего все системы роботов от сенсорики до приводов и даже до конструктивных материалов и "кожи" роботов (интеллектуальные материалы).

Обе эти проблемы соответствуют общим тенденциям развития техники в целом, которые тесно взаимосвязаны: Само понятие интеллектуализации (ис-

кусственного интеллекта) могло возникнуть и приобрести реальный смысл только на определенном этапе развития миниатюризации. Процесс миниатюризации изначально был связан с процессом повышения точности и разрешающей способности создаваемых изделий. Именно последнее является основанием для создания все более и более малоразмерных изделий. Рис. 20.1 иллюстрирует сказанное применительно к автоматике и робототехнике. Здесь показано развитие двух названных тенденций в виде сменяющих друг друга S-образных зависимостей эволюционного развития миниатюризации определенных типов техники, а справа дано развитие интеллектуализации как параметра исходной трехмерной временной зависимости.

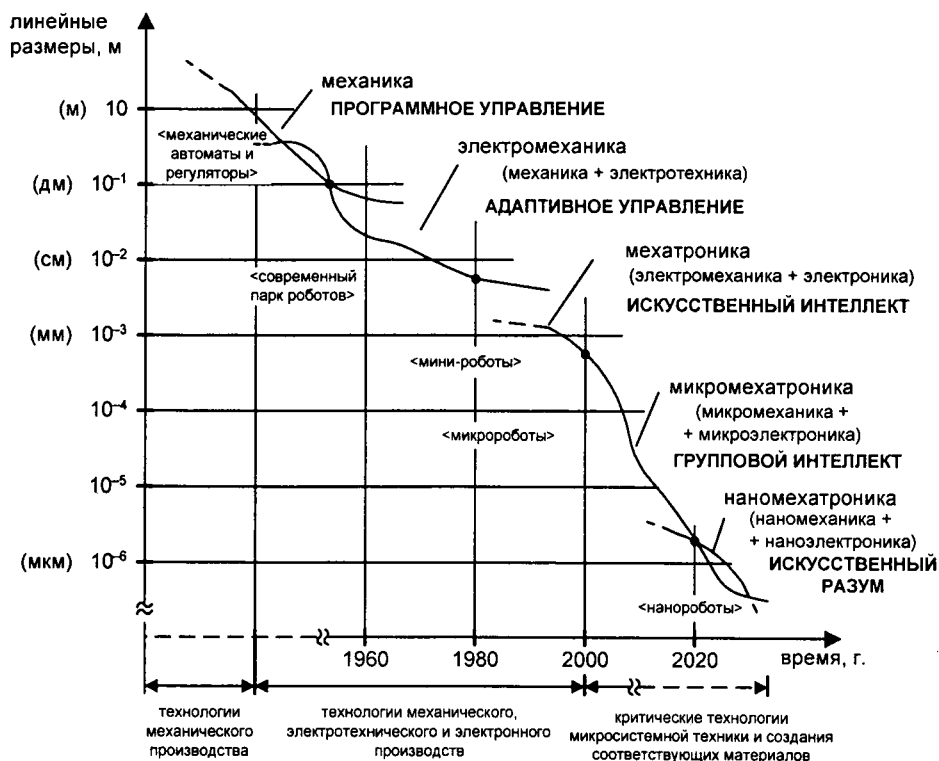


Рис. 20.1. Развитие технических систем (автоматы и роботы)

Процесс миниатюризации на первом этапе связан с механикой и порожден, как сказано, развитием технологий, повышающих точность изготовления деталей. Начался он с производства замков (слесарь — от немецкого слова *schlosser* — замок, затвор и его же изготовитель. Кстати, и в английском языке слово слесарь — *locksmith* от того же корня "замок" — *lock*). Затем вышли

в лидеры часовщики. Именно они создали первые механические изделия счетно-решающей (вычислительной) техники — арифмометры, интеграторы и т. п. В 1950-е гг. механические интеграторы сменились электромеханическими (в составе первых электромеханических вычислительных машин).

Второй этап миниатюризации начался на базе двухмерных (2D) технологий микроэлектроники, сопряженной уже с интеллектуализацией. Символ этого этапа — многослойные платы печатного монтажа. В них достигнута уже субмикронная точность.

На рубеже XXI столетия начался третий этап миниатюризации на базе 3D микросистемных технологий. Это уже не электроника, а трехмерная электромеханика — *микроэлектромеханические системы* (МЭМС).

Каждый из перечисленных этапов не сменял предыдущий, а надстраивал над ним новый уровень. Так, 3D-технологии развились на базе 2D-технологий и добавили механику движений, но с микронным разрешением. Впереди нас ожидает уже исследуемый этап нанотехнологий с молекулярной разрешающей способностью и использование органики — симбиоза живого и техники (биокомпьютеры и т. п.). После этого, очевидно, наступит последний физически возможный этап миниатюризации на атомном уровне.

Рассмотренный процесс, помимо возможности создания все более малоразмерных мини-, микро- и наносистем, создает техническую базу для разработки нового поколения и крупномасштабных объектов вплоть до тяжелого машиностроения, наделенных принципиально новыми, в том числе интеллектуальными, функциональными возможностями и техническими характеристиками.

Интеллектуализация как процесс совершенствования информационно-управляющих возможностей техники также прошла три этапа: программное управление, адаптивное управление и, наконец, на базе микроэлектронной техники и технологий искусственного интеллекта (ИИ) возникло интеллектуальное управление. При этом искусственный интеллект постепенно охватил все функции технических систем, помимо управления. Как и в процессе миниатюризации, здесь каждый последующий этап не заменял предыдущий, а поглощал его: адаптивное управление образует следующий уровень управления над программным, а интеллектуальное включает и программное управление, и адаптацию. Дальнейшее развитие искусственного интеллекта — коллективный интеллект (как у людей), а затем и превышение интеллекта естественного. Следующий качественно новый этап — искусственный разум, воспроизводящий наряду с интеллектом творческие способности (креативность) человека. Разумеется, имеется в виду узко специализированный профессиональный интеллект и разум. (Например, уже не вызывает сомнений, что скоро компьютеры переиграют самых сильных шахматистов.)

Рассматриваемый процесс миниатюризации и интеллектуализации техники начинается, прежде всего, с ее основных компонентов, замкнутых в кольцо через внешнюю среду (сенсорные, информационно-управляющие и исполнительные), затем связь и энергопитание (рис. 20.2). В общем случае их совокупность образует открытую систему, информационно и энергетически зависимую от окружающей среды, включая и другую подобную технику. (В том числе в недалеком будущем — в виде коллективов роботов.)

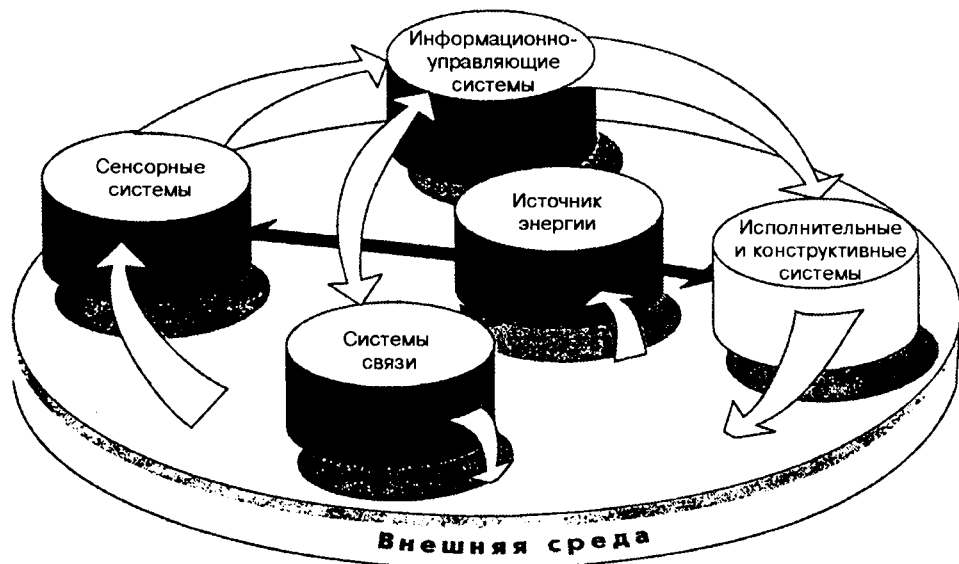


Рис. 20.2. Функциональный состав автоматических систем

В основе миниатюризации этих компонентов, как уже сказано, — повышение точности изготовления деталей, как показано на рис. 20.3. Сегодня в этом процессе по-прежнему лидирует вычислительная техника на базе микроэлектроники: прежде всего информационно-управляющие компоненты, а за ними с определенным отставанием следует сенсорика и связь. Их общая база — 2D-микротехнологии. Начавшийся качественный переход к 3D-микротехнологиям особенно важен для сенсорики, а еще более для силовых компонентов — исполнительных и энергопитания. Общесистемное развитие пока сдерживают последние. Здесь происходит возврат к проблеме миниатюризации механики движений. Пока эти компоненты все еще продолжают эволюционировать на идеях прошлых веков. Но общая тенденция очевидна: технологическое сближение всех компонентов и их конструктивное объединение в мехатронные системы.

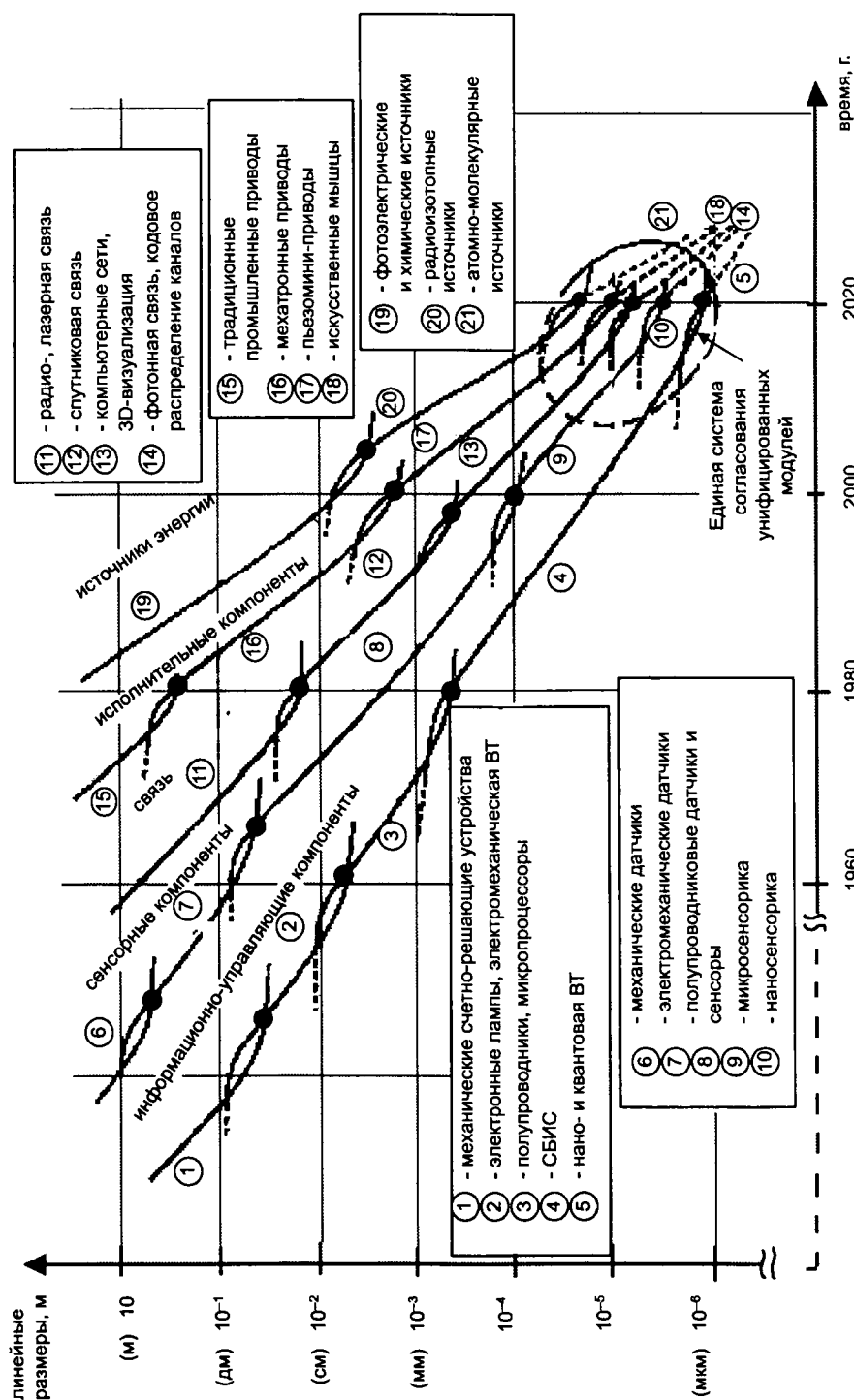


Рис. 20.3. Развитие компонентов технических систем

Подобно тому как микроэлектроника, начавшись с отдельных транзисторов, диодов и других элементов, перешла к объединению их во все более крупные интегральные схемы в виде чипов, эволюция МЭМС так же развивается в направлении создания все более крупных технических систем, объединяющих все рассмотренные ранее функциональные компоненты в единый мехатронный конструктив.

Дальнейшая миниатюризация ведет к переходу на новый наноуровень молекулярной размерности и соответственно к аналогичному укрупнению интегральных нанoeлектромеханических систем — НЭМС.

В заключение приведенного исторического обзора отметим некоторые актуальные задачи по созданию перечисленных ранее компонентов нового поколения робототехнических устройств.

Для сенсорных систем первоочередная задача — комплексирование сенсорных систем различного типа (СТЗ, УЗ, ИК, УФ, радиотехнические и лазерные дальномеры, локаторы и т. д.). Необходимо также развитие химических сенсоров, что, в частности, важно для поиска взрывчатки, наркотиков и более специальных интроскопических сенсоров.

Для информационно-управляющих компонентов наряду с дальнейшим развитием символьных технологий искусственного интеллекта предстоит приступить к решению проблемы создания методов работы с образной информацией и творчества (интуиции).

Для связи применительно к робототехнике одна из важных проблем — связь "оператор-робот". В нее входят задачи:

- ☐ 3D обобщенные виртуальные сцены внешней среды;
- ☐ эффект присутствия;
- ☐ неконтактные способы управления (с отказом от джойстиков и тому подобных механических средств) через 3D-картины внешней среды, включая управление голосом, сенсорные экраны и т. п.

К силовым компонентам (исполнительным и энергопитания) в отличие от других компонентов предъявляются другие основные требования — КПД и удельные массогабаритные параметры. Эти компоненты в своем эволюционном развитии давно уже вышли в насыщение. Во всем мире идет поиск на базе 3D-технологий принципиально новых решений типа искусственных мышц и т. п.

Проведенный анализ общих закономерностей развития техники подтверждает, что рассмотренные основные направления развития робототехники — миниатюризация и интеллектуализация — соответствуют общим тенденциям

в целом и, следовательно, будут реализовываться в тесном взаимодействии со всеми смежными направлениями науки и техники.

В заключение перечислим основные области применения робототехники, где в первую очередь будут реализовываться достижения в решении рассмотренных научно-технических проблем.

1. Робототехника наземного и воздушного базирования. Сюда относятся создание автоводителей и автопилотов, робототехнические системы для действий в экстремальных условиях, в том числе для вооруженных сил и других силовых структур, групповое применение роботов и создание следующих интеллектуальных поколений таких роботов, ориентированных на автономное функционирование. Большие перспективы связаны при этом с микроробототехникой. Летаящие, плавающие, ползающие и тому подобные микророботы произведут качественные изменения во многих важнейших сферах человеческой деятельности.
2. Био- и медицинская робототехника. С ней связана как проблематика заимствования бионических решений, так и обратный процесс внедрения робототехники в живые организмы. Начало последнему положило протезирование конечностей, затем усиление физических возможностей человека для функционирования в экстремальных условиях (активные скафандры, биоуправляемые шагающие машины и т. п.). Наконец, появились новые поколения интеллектуальных протезов и экзоскелетов, роботы-сиделки, робототехнические системы для реабилитации инвалидов, массажисты и т. п. Однако прежде всего — это новые области применения робототехники, такие как хирургия, в том числе дистанционная, микророботы для внутрисосудистой и внутриполостной диагностики и хирургии.
3. Космическая робототехника. Сегодня это важнейшая часть очередного этапа развития исследований и освоения космоса. Космическая робототехника открывает перспективы создания принципиально новых космических аппаратов и их систем, в том числе и в околоземном пространстве, включая наноспутники, монтажно-сборочные и регламентные работы на орбите и т. п.
4. Подводная робототехника. Наряду с космосом это второе направление "экспансии" человечества, в котором решающую роль должна играть робототехника. Если человек-амфибия — это фантастика, то роботы-амфибии — это уже реальность. Достаточно напомнить их работу по обследованию затонувших кораблей, использование подводных роботов-геологов. А ведь это, по существу, еще только предыстория подводной робототехники.

В настоящее время еще нет ни лунных, ни других космических баз, обслуживаемых роботами, нет и подобных подводных сооружений. Однако если сегодня основное направление развития современного машинного производства — это создание безлюдных комплексно-роботизированных предприятий, то тем более это должно относиться к освоению космоса и глубин океана.

Среди перечисленных перспективных областей применения робототехники не названа промышленная робототехника. Объясняется это тем, что, хотя в обозримом будущем основной мировой парк роботов по-прежнему будут составлять промышленные роботы, но этот уже сложившийся раздел робототехники будет определять ее развитие в рассмотренных ранее направлениях.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ДВИЖЕНИЙ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

В табл. П.1 приведены основные этапы эволюции движения, начиная с первых возникших на Земле живых организмов и кончая человеком.

Таблица П.1. Этапы развития движений в живой природе

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Зарождение живой клетки в океане	Одноклеточные	1 млрд
Специализация клеток у многоклеточных с возникновением рецепторных, мышечных, а затем и нейронных клеток, осуществляющих связь между клетками, которая привела к возникновению рефлекторности	Губки	800 млн
Формирование головы со ртом и развитие на ней телерецепторов, ориентированных на внешнюю среду. Появление соответственно возможности целенаправленного движения всего тела в сторону определенных объектов внешней среды, т. е. появление локомоций	Черви	
Головной мозг как центр координированного управления движением всех частей тела	Высшие моллюски (осьминоги, каракатицы и др.)	500 млн
Поперечно-полосатая мышца и скелет, сначала наружный	Членистоногие (ракообразные и др.)	
Внутренний скелет — основа дальнейшего совершенствования двигательных способностей	Рыбы и далее все другие хордовые (позвоночные)	

Таблица П.1 (продолжение)

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Развитие сенсорной коррекции движений как нового уровня управления движением, в функции от текущей информации о внешней среде, и соответствующее совершенствование головного мозга		
Конечности, возникшие из парных плавников рыб при переходе от водного к водно-наземному образу жизни	Земноводные	
Экстрапирамидная двигательная система — иерархическая система управления движением, включающая как древние нижние уровни сегментарного управления туловищем, так и новые уровни управления конечностями, развившиеся в головном мозге и совершенствующиеся у пресмыкающихся, а затем у птиц. У последних эта иерархическая система рефлекторного управления достигла наибольшего совершенства. Развился мозжечок, обеспечивающий координацию движений, равновесие	Земноводные, пресмыкающиеся, птицы	
Пирамидный путь управления мышцами от коры головного мозга, возникший параллельно с иерархическим экстрапирамидным путем. Этот качественный скачок произошел на фоне эволюционно усложняющегося экстрапирамидного пути в результате развития коры головного мозга (зачатки которой появились еще у пресмыкающихся) и явился базой для освоения новых более совершенных (по сложности, быстрдействию, точности) движений и развития самообучения как основы уже не инстинктивного, а разумного поведения	Млекопитающие	100 млн
Рука для манипуляций в процессе трудовой деятельности человека с использованием орудий труда. В результате развилась современная кора полушарий головного мозга	Человек	3 млн
	Специализация людей в трудовом процессе	2 млн
Биотехнические объекты, включающие живые существа и вживленные технические системы, которые расширяют их возможности	Биороботы	30—35

Таблица П.1 (окончание)

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Симбиоз человека и робота — новый этап в развитии живой природы	Человек	Прогноз

Около 1 млрд лет тому назад случайное соединение молекул в Мировом океане дало начало жизни — живую, т. е. размножающуюся клетку. Примерно через 200 млн лет после этого появились первые многоклеточные, у которых со временем начался эволюционный процесс специализации клеток. Из наружных клеток, развивших способность реагировать на внешние раздражения (механические, химические, температурные и др.), возникли сенсорные клетки — рецепторы. Внутренние клетки, приобретя способность сокращаться, превратились в мышечные. В результате возникли первые еще беспорядочные рефлекторные движения, прежде всего, как реакция на внешние воздействия. Необходимая для этого связь между рецепторными и мышечными клетками была сначала реализована химическим путем (с помощью специальных веществ — медиаторов), а затем — с помощью электрических сигналов. Последнее позволило повысить быстродействие, хотя вначале эти сигналы тоже были ненаправленными, диффузно распространявшимися по всему телу. Затем постепенно оформились определенные пути для этих сигналов и появились соответствующие специальные нервные клетки.

Следующим принципиальным этапом эволюции было развитие специализации частей тела животных. Появились продолговатые животные, один конец тела которых, где помещался рот, постепенно обогащаясь рецепторами, стал главным, т. е. головой. Развитие чувствительности этих рецепторов привело к появлению дистанционных рецепторов — телерецепторов (обонятельных — из вкусовых, слуховых — из механических, зрительных — из температурных). Такая дистанционная чувствительность в определенных направлениях дала толчок к организации локомоций, т. е. к целенаправленному передвижению всего тела. В связи с этим потребовалась координация частей тела, в результате чего появился такой центр управления, как головной мозг, задачами которого стали сбор информации от рецепторов, обработка ее и на этой основе выработка сигналов управления мышцами, т. е. движением тела, как реакции на зарегистрированные внешние раздражители.

Важный момент в развитии движения животных — появление поперечнополосатой мышцы, которая в сотни и тысячи раз мощнее и динамичнее ранее возникшей гладкой мышцы. С появлением такого мощного двигателя потребовался жесткий скелет (до этого все живые существа были мягкотелыми).

Эволюция с этого момента пошла двумя путями:

- наружный скелет в виде панциря, состоящий из отдельных пластинок, соединенных внутри мышцами, — у членистоногих;
- скелет из костей внутри с расположенными снаружи соединяющими их мышцами — у хордовых (позвоночных).

Второй путь был сложнее первого, так как помимо собственно движения тела требовалось еще поддержание его позы и устойчивости. Однако именно этот путь обеспечил возможность реализовать значительно более сложные, быстрые и точные движения. В связи с этим первый путь завершился на насекомых, а второй привел к млекопитающим и человеку.

Появление поперечно-полосатой мышцы и жесткого скелета стимулировало дальнейшее совершенствование управления движением путем развития оперативной сенсорной коррекции движений по текущей информации о внешней среде, т. е. адаптивного управления. Это в свою очередь вызвало дальнейшее совершенствование головного мозга.

Другой важный для нашей темы этап эволюции — появление у земноводных конечностей, которые образовались из парных плавников при переходе к водно-наземному образу жизни. Это привело к дальнейшему усложнению и совершенствованию системы управления. К возникшей ранее системе управления локомоциями, построенной по сегментарному принципу, когда каждая часть туловища управляется соответствующей частью спинного мозга, добавилась система управления конечностями посредством импульсов от головного мозга (который управляет при этом и локомоциями в целом). Постепенно развилась сложная иерархическая система управления — *экстрапирамидная* двигательная система, в которой образовывались новые уровни управления, решающие все более сложные задачи и действующие через ранее возникшие уровни, вплоть до сегментарного управления через спинной мозг. Пределом совершенства такого управления являются птицы, которые обладают по сравнению с предшествующими им пресмыкающимися исключительной динамичностью и координацией движения. Однако это управление в целом является рефлекторным, т. е. инстинктивным. Соответственно и кора полушарий головного мозга у птиц осталась в зачаточном состоянии.

Следующим качественно новым этапом явилось возникновение прямого, так называемого *пирамидного* пути управления мышцами от коры головного мозга параллельно многоуровневому и поэтому довольно медленно действующему экстрапирамидному пути. Этот канал управления движением взял на себя осуществление новых более сложных, быстрых и точных движений и привел в свою очередь к интенсивному развитию коры головного мозга. В результате возник новый тип управления — интеллектуальное, основанное на обучении на основании наблюдений, собственного опыта и выработки со-

ответствующих новых алгоритмов поведения. Это достижение принадлежит млекопитающим.

Далее приведены основные типы локомоций, возникшие в животном мире в процессе эволюции.

1. В воде.

1.1. Передвижение по дну:

- путем подтягивания конца туловища к голове, затем перемещение вперед головы с выпрямлением туловища и т. д.;
- с помощью щупалец, присасывающихся к поверхности и затем сокращающихся по длине.

1.2. Реактивное движение:

- путем быстрого захлопывания створок раковин;
- путем забора и резкого выброса воды (каракатицы, гребешки).

1.3. Гребки хвостом у рака.

1.4. Плавание рыб за счет волнообразных изгибаний тела и движений хвоста с использованием парных плавников как рулей глубины.

1.5. Плавание на поверхности воды.

1.6. Передвижение по поверхности воды (некоторые насекомые).

2. В воздухе.

2.1. Махание крыльями (птицы).

2.2. Планирование.

2.3. Парашютирование.

3. Под землей.

3.1. Путем раздвижки (бокового уплотнения) земли (черви).

3.2. Путем выбрасывания земли назад (кроты, мыши).

4. По земле.

4.1. Ползание (змеи и др.).

4.2. Лазанье.

4.3. Хожение (с использованием разного количества ног).

4.4. Прыганье (на двух и четырех конечностях).

4.5. Бег симметричный, несимметричный, прыжковый, галоп и т. д. (с использованием разного количества конечностей).

Последним этапом эволюции движения в живом мире явилось развитие манипуляционных способностей. Самым совершенным универсальным средством для этого стали руки человека. При дальнейшем развитии движений на первое место выступает уже не биологическое совершенствование отдельного человека, а значительно более интенсивное во времени его общественное развитие, включая разделение труда, с доведением до все большего совершенства профессиональных навыков, и развитие орудий труда.

И, наконец, завершением этого процесса стало создание дополняющих и заменяющих человека машин-роботов как универсальных средств для выполнения манипуляционных и локомоционных действий в производстве и других сферах человеческой деятельности. Дальнейшее совершенствование манипуляционных движений будет происходить, следовательно, уже в результате симбиоза человека и робота на основе развития робототехники и преодоления тех принципиальных ограничений, которые присущи человеку и живой природе в целом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОПИСАНИЕ КОМПАКТ-ДИСКА

На компакт-диске находится видеоприложение к книге — файл Osnovy_Robototechniki.avi.

Для того чтобы посмотреть видеоприложение, необходимо иметь на вашем компьютере кодек DivX. Свободно распространяемую версию кодека можно скачать с сайта производителя по адресу

<http://www.divx.com/divx/download/index.php>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юревич Е. И. ЦНИИ РТК. История создания и развития. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999.
2. Бернштейн Н. А. О построении движений. — М.: Машиностроение, 1975.
3. Буняков В. А., Юревич Е. И. Техническое зрение в робототехнике. — СПб.: Астерион, 2008.
4. Макаров И. М., Лохин В. М., Романов М. П. Система управления транспортным роботом с рекуперацией энергии // Пробл. машиностроения и моделирования в сложных технологических системах. — М.: МИРЭА, 1995.
5. Shahinpoor M. Artificial Muscles: New Mexico, ERI Press, Albuquerque, Pending Pulications, 1997.
6. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.
7. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. — М.: Изд-во МГОУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
8. Бурдаков С. Ф. Математические модели и идентификация роботов с упругими элементами. — СПб.: СПбГТУ, 1990.
9. Компьютерные технологии в науке. Моделирование и идентификация. — СПб.: СПбГПУ, 2007.
10. Корендсяев А. И., Соламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники. — М.: Наука, 2006.
11. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов. — М.: Наука, 1991.
12. Пятницкий Е. С. Принцип декомпозиции в управлении механическими и электромеханическими системами // Синтез систем управления манипуляционными роботами на принципе декомпозиции. — М.: ИПУ, 1987.

13. Попов А. В., Юревич Е. И. Роботы с силовым очувствлением. — СПб.: Астерион, 2008.
14. Макаров И. М., Лохин В. М., Романов М. П., Манько С. В. Интеллектуальные системы управления. — М.: Наука, 1999.
15. Интеллектуальные роботы / Под ред. Е. И. Юревича. — М.: Машиностроение, 2007.
16. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. В. С. Кулешова и Н. А. Лакоты. — М.: Машиностроение, 1986.
17. Макарычев В. П., Юревич Е. И. Супервизорное управление космическими манипуляторами. — СПб.: Астерион, 2005.
18. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Распределенные системы планирования действий коллективом роботов. — М.: Янус-К, 2002.
19. Юревич Е. И. Проектирование технических систем. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютные координаты 109
Автоколебания 165
Адаптация 186
Адаптивная подстройка привода 147
Аксон 22, 25
Андроид 8, 13
Анизотропный элемент (диск) 25
АСУ (автоматизированная система управления) 208

Б

База знаний 195
Биоробот 325
Биотехническая система управления 208
Быстродействие 49

В

Внутренняя адаптация 187
Волокна 25

Г

ГАП (гибкие автоматизированные производства) 271
Гидравлические приводы 92, 97
Грузоподъемность манипулятора 48
Гуманоидный робот 14

Д

Датчик 78, 82
Движитель 67
Демпфер 94
Дендрит 22
Дуальное управление 142

З

Задача идентификации 131
Задающий манипулятор 211
Захватное устройство 63

И

Иерархическая адаптация 187
Изотропный элемент 25
Инверсный регулятор 168
Интегральный робот 13
Интеллектуальный робот 13
Интерактивное управление 222
Интернейрон 24
Исполнительный манипулятор 211

К

Кинематическая схема 55

Л

Локатор 79
Локомоция 21

М

Манипулятор 47, 51, 117
Манипуляция 21
Матричная структура управления 229
Метод "замороженных" коэффициентов 128
Мехатронная система 340
Микроактиватор 337
Микроробот 324
Микроэлектромеханическая система (МЭМС) 339
Мини-робот 325
Модулирующий нейрон 24
Модуль 255
Модульный принцип построения 255
Мотивация 40
Мотонейрон 24
Мультиагентная система 240
Мышцы-антагонисты 26

Н

Наблюдатель 181
◊ силы 181
Нанотехнология 339
Напланетный робот 75
Нейрон 22
Нейрон-детектор 24
Нейронные сети 198

О

Однородные координаты 112
Околороботная оснастка 252
Относительные координаты 109
Очувствление 186
Очувствленный робот 12

П

Параметрическая адаптация 186
ПД-регулятор 173
Педипуляторы 70
ПИД-регулятор 175
Пневматические приводы 93
Пневмоцилиндр 93

Поворотный пневматический двигатель 93
Подвижность робота 49
Позиционно-силовое управление 221
Привод 56, 58, 125
Принцип
◊ агрегатного построения 257
◊ базового изделия 257
Промышленный робот (Industrial Robot) 11, 47, 259
Противовесы 120
Пьезопровод 103

Р

Рабочая зона манипулятора 49
Рабочий инструмент 67
Рекуперация энергии 99
Релейное управление 137, 153, 164
Рецептор 24
Робастная система управления 160
Робокар 67
Робот 3, 9
◊ вспомогательный 47
◊ мобильный 49
◊ специальный 48
◊ технологический 47
◊ универсальный 48
Роботизированный технологический комплекс (РТК) 287
РТС (робототехнические системы) 259, 309
Робототехника 3

С

Самотормозящаяся передача 216
САУ (система автоматического управления) 208
Сбалансированные манипуляторы 87, 270
Семантические сети 195
Сенсорные системы 78
Сети фреймов 195
Синапс 22
Система технического зрения (СТЗ) 12, 81

Ситуационное управление 202
Скоростно-позиционное управление 220
Скоростно-позиционно-силовое
управление 221
Скоростно-силовое управление 221
Следящие приводы 212
Стандартизация 255
Степени подвижности 51
Структурная адаптация 186
Схват 63
Схема с эталонной моделью 148

Т

Телерецептор 347
Технологическая линия (ТЛ) 261
Технологическая система 312
Технологическая ячейка (ТЯ) 261
Технологический участок (ТУ) 261
Торможение 99, 136
Точность
◊ манипулятора 50
◊ робота 50
Транспьютер 234, 249

У

Унификация 254
Управление от оператора
◊ по положению 219
◊ по скорости 220
◊ по силе 220
Управляемая деформация 61

Упругость
◊ распределенная 122
◊ сосредоточенная 122
Уравнение Лагранжа второго рода 113,
124
Устройство уравнивания 56
УЧПУ (устройство числового
программного управления) 243

Ц

Цикловое управление 136

Ч

Человечно-машинная система управления
208

Ш

Шагание 70
Штабелер 236

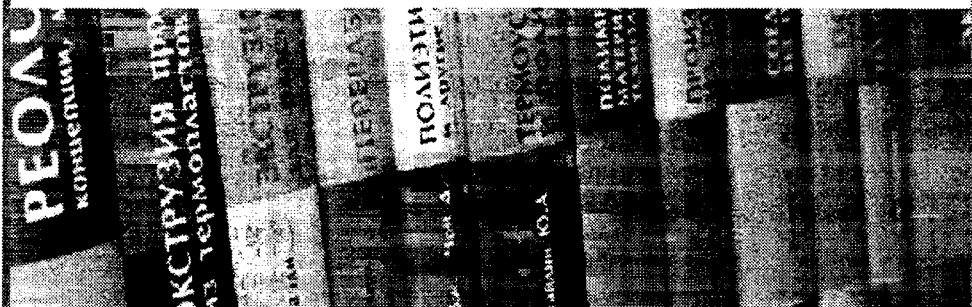
Э

Экзоскелетон 13, 306
Экспертная система 196
Экстремальные условия 309
Электрические приводы 98
Эталонная модель 148
Эффект отражения усилия 213

Магазин-салон

«НОВАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КНИГА»

**190005, Санкт-Петербург,
Измайловский пр., 29**



В МАГАЗИНЕ ПРЕДСТАВЛЕНА ЛИТЕРАТУРА

**по компьютерным технологиям, радиотехнике и электронике,
физике и математике, строительству и архитектуре, транспорту,
машиностроению и другим естественно-научным
и техническим направлениям**

Низкие цены

Прямые поставки от издательств

Ежедневное пополнение ассортимента

Подарки и скидки покупателям

**Магазин работает с 10.00 до 20.00
без обеденного перерыва
выходной день — воскресенье**

**Тел.: (812) 251-41-10, e-mail: trade@techkniga.com
www.bhv.ru**