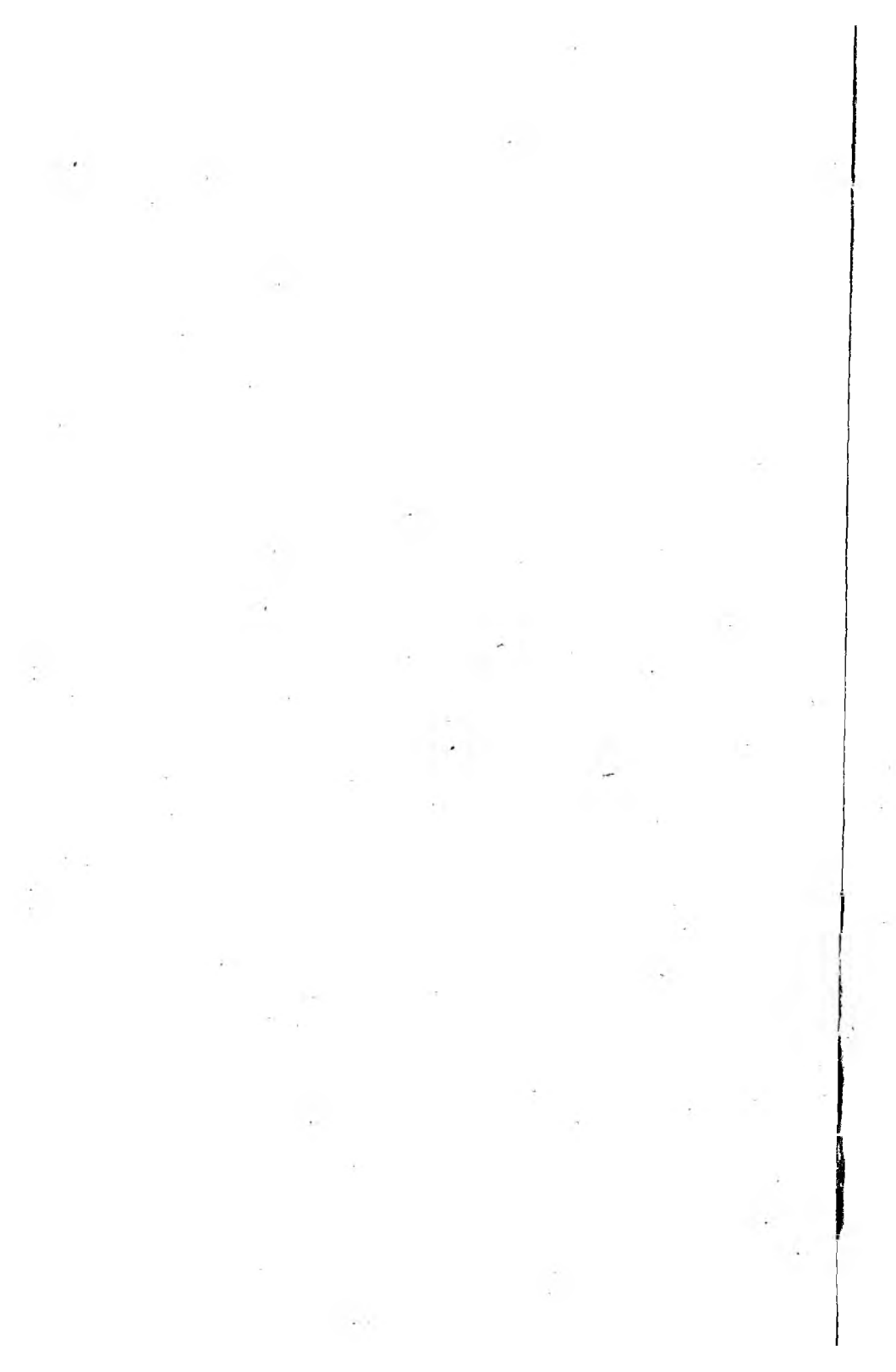




В

ДЛЯ ВУЗОВ

Е. И. Юревич

ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов
высших технических учебных заведений*



ЛЕНИНГРАД
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1986

ББК 32.816я7
Ю68
УДК 007.52 (075)

6Ф0.1
Ю68

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

кафедра «Автоматические системы и робототехника»
Ленинградского механического института (д-р техн. наук
проф. А. М. Потапов) и д-р техн. наук проф. П. Н. Белянин

Юревич Е. И.

Ю68 Основы робототехники: Учебник для вузов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 271 с., ил.

В пер.: 95 к.

Ю 2404000000-917 КБ-16-40-1985
038 (01)-85

ББК 32.816я7
6Ф0.1

Издательство «Машиностроение», 1985 г.

ОБЛОЖКА

Роботостроение — новое научно-техническое направление развития народного хозяйства, которое наряду с микропроцессорной техникой составляет основу комплексной автоматизации производства и создания гибких производственных систем. В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», принятых XXVI съездом КПСС, роботостроение отмечено в числе первоочередных задач развития отечественной науки и техники на этот период.

Быстрое развитие робототехники и применение ее практически во всех отраслях народного хозяйства и сферах человеческой деятельности диктуют необходимость расширить подготовку и переподготовку инженерно-технических кадров по робототехнике.

Учебник для вузов по общему курсу «Основы робототехники» предназначен для студентов специальности «Робототехнические системы» (0654), а также для студентов, специализирующихся в области робототехники. Книга может быть рекомендована для инженеров, проходящих переподготовку по специальности «Механика и управление машинами — роботы и манипуляторы», и, кроме того, для инженеров и научных работников, занимающихся созданием и применением средств робототехники.

Учебник написан по материалам лекций, которые автор читает в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина для студентов-электромехаников.

Задача робототехники — это создание и применение роботов и основанных на их использовании робототехнических систем различного назначения. Возникнув на основе механики и кибернетики, робототехника породила новые направления их развития. Для механики это прежде всего связано с многозвенными механизмами типа манипуляторов, а для кибернетики — с интеллектуальным управлением, которое требуется для роботов с искусственным интеллектом.

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 сегодняшнего дня образцом для них служат физические возможности человека. Именно стремление заменить человека на тяжелых работах и породило сначала идею робота, затем первые попытки ее реализации (в середине века) и, наконец, обусловило возникновение и развитие робототехники и роботостроения (в последние десятилетия).

Как показано на рис. В.1, в состав робота прежде всего входят один или несколько манипуляционных устройств, которыми обычно являются механические манипуляторы. Такой манипулятор состоит из нескольких кинематических пар с поступательным или угловым перемещением, снабженных приводами (электрическими, гидравлическими или пневматическими). На конце манипулятора имеется рабочий орган в виде захватного устройства или какого-либо специального инструмента. Следующими частями робота являются устройство передвижения, если робот подвижный, и *устройство автоматического управления*. Последнее в свою очередь включает чувствительные (сенсорные) устройства — «органы чувств» робота, устройства обработки и хранения информации (вычислительное устройство) — «мозг» робота и устройства управления приводами манипуляционных устройств и устройств передвижения.

Из данного определения следует, что робот — это машина автоматического действия, которая объединяет свойства машин рабочих и информационных, являясь, таким образом, принципиально новым видом машин. В достаточно развитом виде роботы аналогично человеку осуществляют активное силовое и информационное взаимодействие с окружающей средой и могут обладать искусственным интеллектом. Правда, пока еще роботы очень далеки по своим возможностям от человека и прежде всего по интеллектуальным способностям.

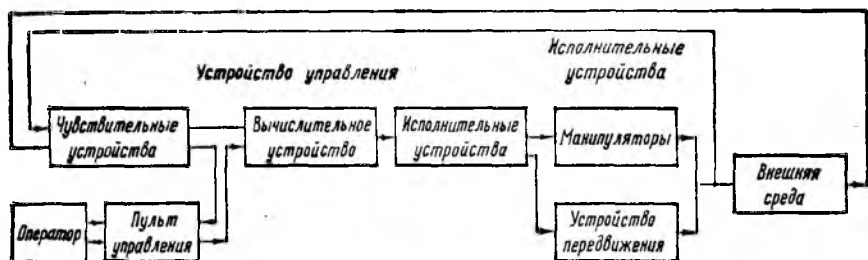


Рис. В.1. Функциональная схема робота

При решении проблемы создания роботов одним из естественных путей является копирование человека и живой природы вообще. Однако не менее важен сейчас и тем более в перспективе поиск принципиально новых путей, определяемых возможностями современной техники. Пример первого подхода — создание механических рук шарнирного типа и захватных устройств со сгибающимися пальцами. Примеры второго подхода — использование электромагнитного поля для ориентации и взятия предметов и, наконец, колесный ход вместо шагания. Аналогичные примеры можно найти и применительно к проблеме оцувствления (создание «сверхчувственных» органов наряду с копированием органов чувств животных и т. п.).

В качестве средств автоматизации роботы принципиально отличаются от других таких средств своей универсальностью (многофункциональностью) и быстротой перехода на новые операции (гибкостью). Под универсальностью мы понимаем универсальность самих рабочих органов робота и их движений, хотя сегодня до универсальности руки человека роботам еще далеко. (Правда, это компенсируется возможностью быстрой смены рабочих органов робота в процессе выполнения одной операции.) Универсальность управления движениями позволяет, в частности, выполнять и такие операции, которые невозможно заранее запрограммировать. Именно к ним относятся многие вспомогательные производственные операции, не поддающиеся традиционной механизации и автоматизации, поскольку последние основаны на сугубо специальных, т. е. «одноразовых», средствах.

Универсальность роботов дает возможность автоматизировать принципиально любые операции, выполняемые человеком, а быстрота перестройки на выполнение новых операций при освоении новой продукции или иных изменениях в производстве позволяет сохранить за автоматизируемым с помощью роботов производством до крайней мере ту же гибкость, которую на сегодня имеют только производства, обслуживаемые человеком. Роботы потому и появились всего лишь примерно 20 лет назад, что именно сейчас назрела необходимость в таких универсальных и гибких средствах автоматизации, без которых невозможно осуществить комплексную автоматизацию современного производства с его большой номенклатурой и частой сменяемостью выпуска продукции, включая создание гибких автоматизированных производств.

В дополнение к изложенному заметим, что роль роботов в создании автоматизированных производств не сводится к использованию их только в качестве универсального средства автоматизации, т. е. для обслуживания основного технологического оборудования. Когда роботы выполняют основные технологические операции (сварку, окраску, сборку и т. д.), они являются уже не средством автоматизации, а сами выступают как основное оборудование.

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

По способу управления роботов различают:

роботы с *программным управлением*, которые работают по заранее заданной жесткой программе, это так называемые роботы первого поколения;

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

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

Помимо роботов для тех же целей широкое применение получили манипуляторы с ручным управлением (копирующие манипуляторы, телеоператоры и т. п.) и с различными вариантами полуавтоматического и автоматизированного управления, а также однопрограммные (не перепрограммируемые) автоматические манипуляторы (автооператоры и механические руки). Все эти устройства являются предшественниками роботов. Появились они главным образом для манипулирования объектами, непосредственный контакт с которыми для человека вреден или опасен (радиоактивные вещества, раскаленные болванки и т. п.). Однако хотя появление роботов существенно сузило сферу их применения, эти простые средства механизации и автоматизации не потеряли своего значения, а отдельные их типы, такие, например, как сбалансированные манипуляторы с ручным управлением, переживают сейчас второе рождение, особенно в связи с проблемой механизации подъемно-транспортных работ.

Таким образом, весь класс перечисленных выше манипуляционных машин и механизмов, которыми занимается робототехника, имеет общее наименование «роботы и манипуляторы».

Определения приведенных выше терминов даны в соответствующих отечественных ГОСТах по этому новому научно-техническому направлению.

За рубежом в целом используют ту же терминологию. (Исключение составляет, пожалуй, только Япония, где в понятие «робот» включены все виды манипуляторов вплоть до ручных. Поэтому официальные японские данные о парке роботов, если при этом не делается соответствующих оговорок, оказываются завышенными в шесть-семь раз по сравнению с данными других стран, что иногда создает недоразумения при оценке парка роботов в мире.)

Как уже было отмечено, именно историческая потребность современного производства в гибкой автоматизации с устранением человека из непосредственного участия в машинном производстве, а также недостаточность для этой цели традиционных средств автоматизации явились объективной причиной возникновения и развития робототехники. Поэтому задачей робототехники наряду с созданием собственно роботов является разработка основанных на их использовании систем и комплексов различного назначения. Роль роботов в таких системах и комплексах может быть различной — от основной, когда роботы осуществляют главные функции, до вспомогательной, когда роботы обслуживают основное оборудование, выполняющее эти функции.

Системы и комплексы, автоматизированные с помощью роботов, принято называть *роботизированными*. Роботизированные системы и комплексы, в которых роботы выполняют основные функции, могут быть названы *робототехническими*.

Наряду с внедрением в действующие производства роботы открывают широкие перспективы для создания принципиально новых технологических процессов, не связанных с весьма обременительными ограничениями, налагаемыми непосредственным участием в них человека. При этом мы имеем в виду как действительно очень ограниченные физические возможности человека (по грузоподъемности, быстродействию, точности, повторяемости и т. п.), так и требуемую для него комфортность условий труда (соответствующее качество атмосферы, отсутствие вредных внешних воздействий и т. п.). Сегодня необходимость непосредственного участия человека в технологическом процессе зачастую является серьезным препятствием при интенсификации производства и создании новых технологий.

Роботы получили наибольшее распространение в промышленности и прежде всего в машиностроении. Предназначенные для этой цели роботы называют *промышленными роботами* (ПР), а автоматизированные на их базе технологические комплексы — *роботизированными технологическими комплексами* (РТК). Не менее широкие перспективы имеют роботы в горнодобывающей промышленности, металлургии и нефтяной промышленности (обслуживание буровых установок, монтажные и ремонтные работы), в строительстве (монтажные, отделочные, транспортные работы), в легкой, пищевой, рыбной промышленности.

Наряду с использованием в промышленности роботы начинают внедрять и в другие области народного хозяйства: в транспорт (включая создание *сагающих* транспортных машин), в сельское хозяйство, здравоохранение (протезирование, хирургия — стериль-

ная, дистанционная, микрохирургия, обслуживание больных и инвалидов, транспортировка), в сферу обслуживания (хозяйственно-бытовые и спасательные работы), для исследования и освоения океана и космоса, научных исследований (активное изучение объектов и сбор информации, моделирование объектов живой природы и человеческой деятельности).

Применение роботов наряду с конкретным технико-экономическим эффектом, связанным с повышением производительности труда, сменности работ оборудования и качества продукции, является одним из важных путей решения все более острой проблемы трудовых ресурсов, а также имеет большое социальное значение, так как позволяет освободить людей от тяжелого, опасного и монотонного труда. Можно сказать, что роботизация производства — это необходимая и обязательная материальная предпосылка превращения труда в первейшую жизненную потребность человека и преодоления различий между умственным и физическим трудом в сфере материального производства. При этом применение роботов способствует решению одного из серьезных противоречий современного производства между растущей специализацией трудовых операций как условием повышения производительности труда, с одной стороны, и необходимостью усиления содержательности и творческого характера труда, с другой.

1.1. ПРЕДЫСТОРИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Корни робототехники уходят в глубокую древность. Уже тогда впервые возникли идеи и были предприняты первые попытки создания человекоподобных технических устройств, подвижных культовых статуй, механических слуг и т. п. Статуи богов с подвижными частями тела (руки, голова) появились еще в Древнем Египте, Вавилоне, Китае.

В «Илиаде» Гомера божественный кузнец Гефест выковывает механических слуганок. Аристотель упоминает о приводимых в движение с помощью ниток куклах-марионетках, из которых создавались целые механические театры. До нас дошли книги Герона Александрийского (I век н. э.), где описаны подобные и многие другие автоматы древности. В качестве источника энергии в них использовались 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 создании первых подвижных человекоподобных механических фигур — андроидов. Так, андроид алхимика Альберта Великого (1193—1280) представлял собой куклу в рост 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 18 в. одновременно с расцветом часового мастерства. Механиками-часовщиками были созданы андроиды-музыканты, рисовальщики, писцы. К ним относятся, например, «флейтист» французского механика Жака Вокансона (1709—1789) — фигура в рост человека; с помощью подвижных пальцев «флейтист» исполнял заложенные в его программу 11 мелодий.

Целый ряд человекоподобных автоматов был создан швейцарскими часовщиками Пьером-Жаком Дро (1721—1790) и его сыном

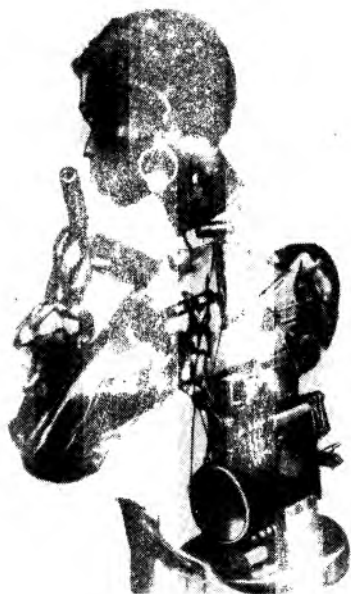


Рис. 1.1. Механический негр-флейтист (XIX в., Пражский национальный музей)



Рис. 1.2. Механический писец Анри Дро

Анри Дро (1752—1791). От имени последнего было образовано позднее и само название «андроид». Эти человекоподобные игрушки представляли собой многопрограммные автоматы с оперативно сменяемыми программами. Программы задавались с помощью сменных кулачков, устанавливаемых на вращающемся барабане, и других подобных механических устройств. Привод осуществлялся от часового механизма (рис. 1.1 и 1.2).

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

Идеи создания «механических» людей, начавшие было затухать вместе с ослаблением роли часового дела в дальнейшем развитии техники, вновь возродились в 20 в. на основе электроники и электротехники.

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, вставал, двигал руками, говорил. Несколько подобных автоматов под названием «Сабор» были построены в Австрии Августом Губером. Они имели управление по радио, могли ходить, говорить, выполнять различные манипуляции. В основном подобные устройства создавали в рекламных целях, хотя делались попытки использовать их для различных практических целей [12].

Любопытно напомнить, что в 1937 г. на Всемирной выставке в Париже демонстрировался радиоуправляемый подвижный робот, созданный советским восьмиклассником В. Машкевичем.

К этому времени уже «прижился» термин «робот», а идеи робототехники все более энергично внедрялись в научно-фантастическую литературу.

1.2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Как уже было указано, современная робототехника возникла в последние два десятилетия, когда в ходе развития общественного производства появилась реальная потребность в универсальных манипуляционных машинах-автоматах, подобных «механическим людям», описанным К. Чапеком, и одновременно были созданы необходимые для этого научно-технические предпосылки и прежде всего кибернетика и вычислительная техника.

Современными предшественниками роботов явились различного рода устройства для манипулирования на расстоянии объектами, непосредственный контакт человека с которыми опасен или невозможен. Это манипуляторы с ручным и автоматизированным управлением. Первые из них были пассивными, т. е. без приводов, и служащими для повторения на некотором расстоянии движений руки человека целиком за счет его мускульной силы. Затем были созданы манипуляторы с приводами и различными вариантами управления человеком вплоть до биоэлектрического.

Первые такие манипуляторы были созданы в 1940—1950 гг. для использования в атомных исследованиях, а затем в атомной промышленности (рис. 1.3 и 1.4). Подобные манипуляторы получили также применение в глубоководной технике, металлургии и других отраслях промышленности.

Первые автоматически действующие манипуляторы созданы в США в 1960—1961 гг. В 1961 г. разработан такой манипулятор, управляемый от

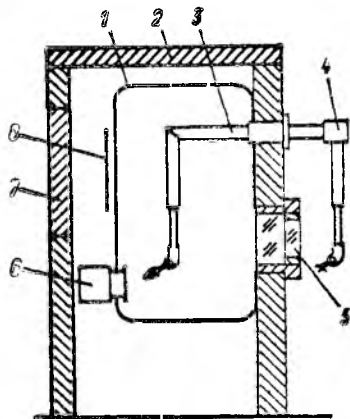


Рис. 1.3. Горячая камера с копирующим манипулятором:

1 — корпус камеры; 2 — биологическая защита; 3 — исполнительный орган манипулятора; 4 — задающий орган манипулятора; 5 — смотровое окно; 6 — транспортер для объектов манипулирования; 7 — дверь в ремонтную зону; 8 — дверь камеры

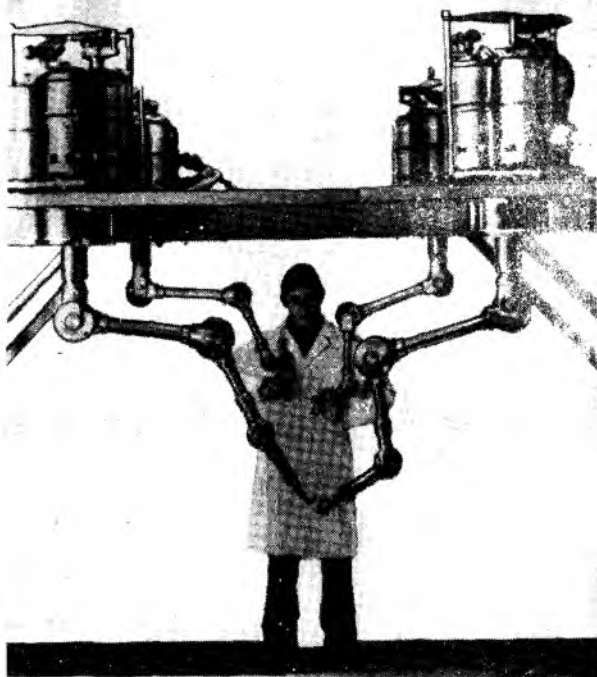


Рис. 1.4. Копирующий манипулятор для работы с радиоактивными объектами в горячих камерах

ЭВМ и снабженный захватным устройством, очувствленным с помощью различного типа датчиков — контактных, давления и фотозлектрических. Этот манипулятор МН-1 получил название «рука Эрнста» по фамилии его создателя Г. Эрнста [17, 18]. По современному определению, это был прообраз очувствленного робота второго поколения с адаптивным управлением, что позволяло ему, например, находить и брать произвольно расположенные предметы.

В 1962 г. на рынке США появились первые роботы марки «Версо-тран» (фирмы «Америкен мэшин энд фаундри»), предназначенные для промышленного применения (рис. 1.5). Одновременно возник термин «промышленный робот», по-видимому, предложенный этой фирмой. В то же время в США появились роботы «Юнимейт-1900», которые получили первое применение в автомобильной промышленности на заводах фирм «Дженерал моторс» и «Форд», а также «Дженерал электрик» (рис. 1.6).

Хронология дальнейшего развития производства роботов за рубежом такова: в 1967 г. начат выпуск роботов в Англии по лицензии США, в 1968 г. — в Швеции и Японии (тоже по лицензии США), в 1971 г. — в ФРГ, в 1972 г. — во Франции, в 1973 г. — в Италии.

Динамика роста парка роботов в мире показана на рис. 1.7. Как видно из рисунка, в 1975 г. в мире имелось уже 8500 роботов, а в 1980 г. — 28 тыс. Из них на Японию, которая сегодня занимает первое место в капиталистическом мире по производству и использованию промышленных роботов, приходилось около 14 тыс. роботов, на США — 4000, на Западную Европу — тоже около 4000 шт. В табл. 1.1 приведен парк промышленных роботов в основных капиталистических странах, включая его прогноз до 1990 г.

Производством роботов в мире заняты около 200 фирм, в том числе в Японии — 70, в Западной Европе — около 90 и в США — около 30, которые выпускают более 250 марок роботов промышленного применения (промышленных роботов). Около 40 % парка роботов — это пневматические роботы грузоподъемностью до 20 кг с простым цикловым управлением стоимостью порядка 10 тыс. долл. Несколько меньше гидравлических промышленных роботов в основном большой грузоподъемности. Остальная часть парка приходится на электромеханические роботы средней грузоподъемности 10—30 кг. Как правило, пока это роботы первого поколения с программным управлением. И хотя такие простейшие роботы будут применять и в будущем, уже к 1985 г., судя по прогнозам, значительную часть парка составят роботы второго поколения с развитыми средствами осязания и микропроцессорным управлением, а к 1990 г. основным типом станут роботы с элементами искусственного интеллекта. Именно эти поколения промышленных роботов позволяют завершить

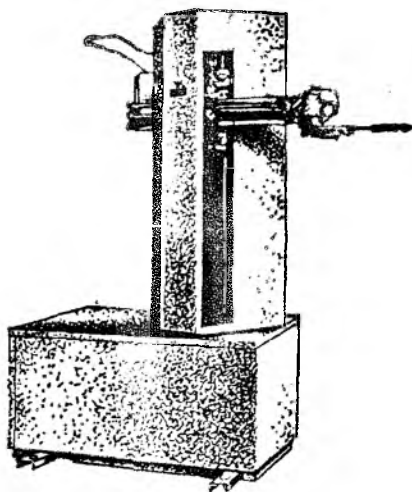


Рис. 1.5. Один из первых промышленных роботов «Версотран»

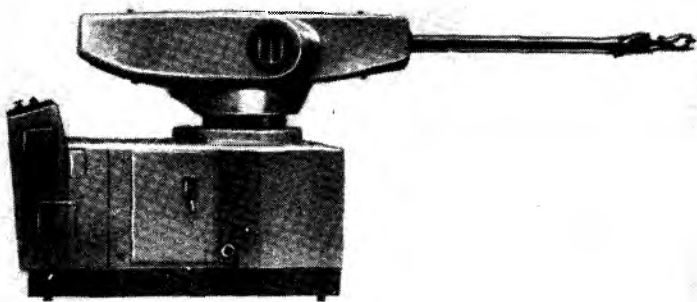


Рис. 1.6. Один из первых промышленных роботов «Юнимейт»

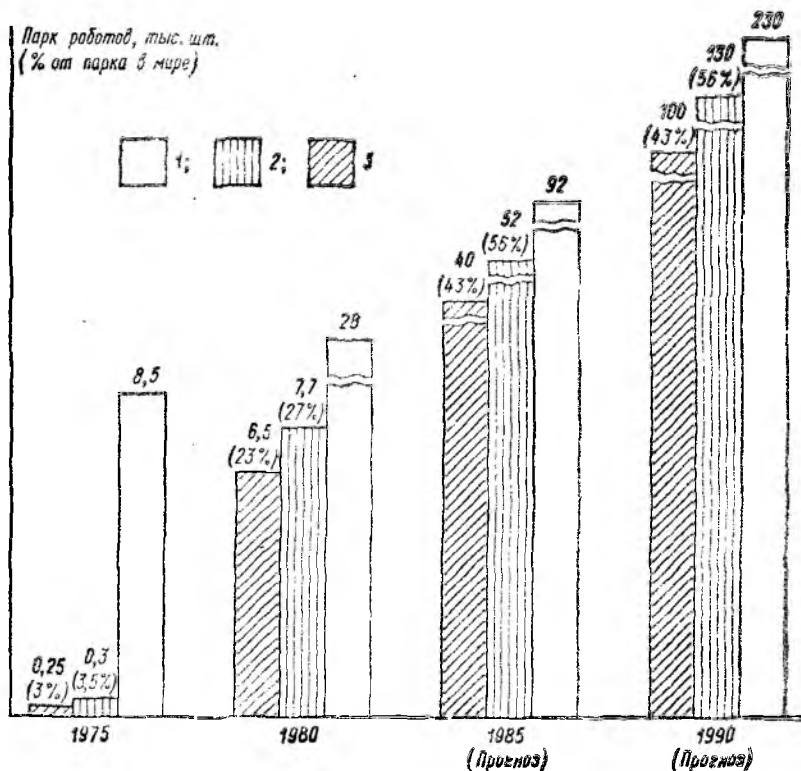


Рис. 1.7. Парк роботов в мире (1), в странах—членах СЭВ (2) и в СССР (3)

к этому времени замену основной части рабочих, занятых тяжелым и монотонным трудом в промышленности, включая сборочно-монтажные, контрольно-проверочные и наладочные операции, и осуществить комплексную автоматизацию промышленности.

1.1. Парк промышленных роботов в основных капиталистических странах

Страна	1980 г.	1985 г.	1990 г.
		(прогноз)	
Англия	371	3 000	21 500
Бельгия	42	175	—
Голландия	51	—	—
Дания	66	110	250
США	4 100	7 715	32 350
Финляндия	116	950	3 000
ФРГ	1 420	5 000	12 000
Швейцария	50	600	5 000
Япония	14 246	16 000	29 000
Всего:	20 462	33 550	103 100

Работы по созданию роботов следующих поколений развернулись практически одновременно с появлением первых роботов с программным управлением.

В 1967 г. в США (Станфордский университет) был создан лабораторный макет робота, снабженного техническим зрением и предназначенного для

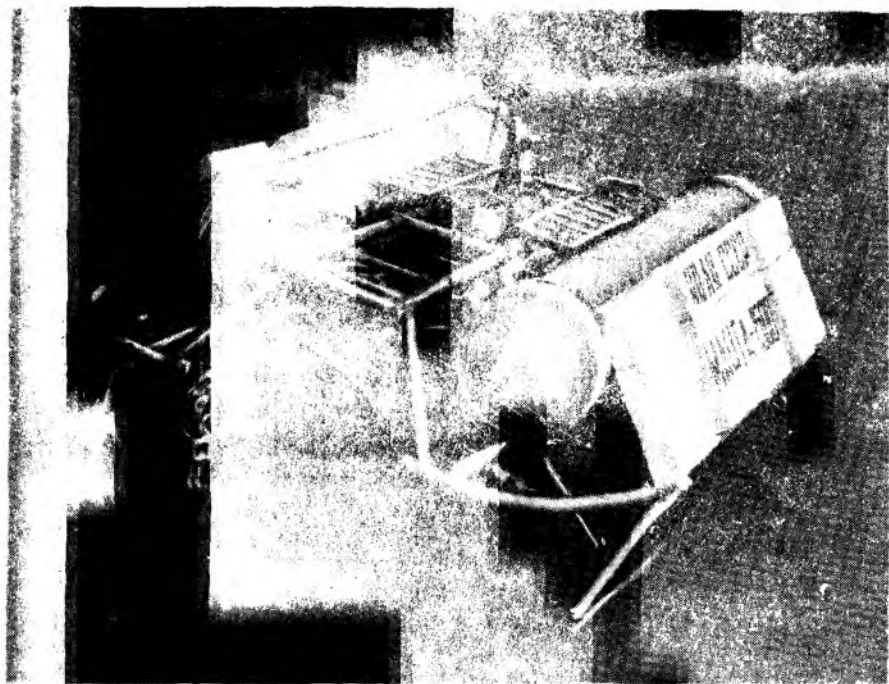


Рис. 1.8. Один из первых отечественных подводных роботов «Манта» с техническим зрением и манипулятором, управляемым от ЭВМ

исследования и отработки системы «глаз — рука», способной распознавать объекты внешней среды и оперировать с ними в соответствии с заданием [17, 18].

В 1968 г. в СССР (Институтом океанологии Академии наук СССР совместно с Ленинградским политехническим институтом и другими вузами) был создан телеуправляемый от ЭВМ подводный робот «Манта» с осязательным захватным устройством, а в 1971 г. — следующий его вариант с техническим зрением и системой целеуказания по телевизионному экрану (рис. 1.8) [21].

В 1969 г. в США (Станфордский научно-исследовательский институт) в рамках работы по созданию искусственного интеллекта был разработан экспериментальный макет подвижного робота «Шейки» 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. 1.9).

В 1971 г. в Японии были разработаны экспериментальные образцы роботов с техническим зрением и элементами искусственного интеллекта: робот «Хивип», способный самостоятельно осуществлять механическую сборку простых объектов по предъявленному чертежу (рис. 1.10), и робот ЭТЛ-1 (рис. 1.11).

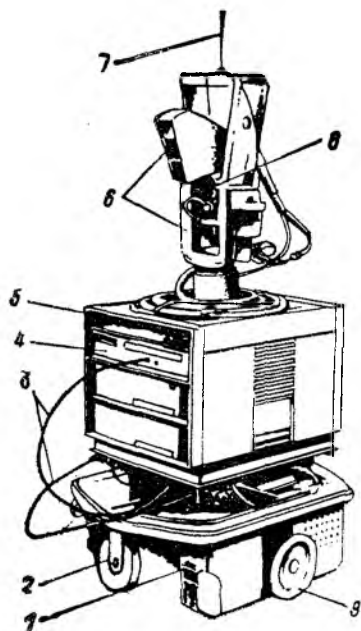


Рис. 1.9. Лабораторный интегральный подвижный робот СРИ («Шейки») Станфордского научно-исследовательского института (США):

1 — привод колеса; 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

«Цинциннати милакрон», «Аид-800», сборочные робототехнические системы фирм «Хитачи», «Вестингауз» (система «Апас»), «Дженерал моторс» (система «Консайт»).

В табл. 1.2 показано распределение парка промышленных роботов по областям применения согласно данным на 1980 г. Четко прослеживается тенденция к расширению использования роботов на основных операциях и прежде всего при сборке и дуговой сварке. Так, в США к 1990 г. количество роботов, используемых на сборочных операциях, возрастет с 3 до 23 %, а на дуговой сварке — с 5 до 10 %.

На рис. 1.13 и в табл. 1.3 приведены данные прогноза по областям применения роботов в некоторых капиталистических странах.

Ниже перечислены новые области применения промышленных роботов в отраслях промышленности ФРГ [41].

1. Керамическая промышленность: выдавливание керамического сырья, загрузка вальцовых (крокетных) машин, извлечение сформо-

В этот период и в ряде других стран создают подобные экспериментальные установки, так называемые интегральные роботы, включающие манипуляторы, управляющие ЭВМ, различные средства оцувствления и общения с человеком-оператором, которые предназначены для проведения исследований в области создания роботов следующих поколений, а также искусственного интеллекта [6].

Одновременно развернулись работы в новой специфической области робототехники — шагающие машины как принципиально новое транспортное средство повышенной проходимости, образцом которого являются ноги животных и человека. Были созданы экспериментальные образцы четырех- и шестиногих транспортных машин, протезов ног человека, так называемых экзоскелетов, для парализованных и тяжелобольных (рис. 1.12) [9].

Первые промышленные роботы с развитым оцувствлением, включая техническое зрение, и микропроцессорным управлением начали появляться на рынке и получать практическое применение в 1980 — 1981 гг. прежде всего при сборке, дуговой сварке, контроле качества, для взятия неориентированных предметов, например, с конвейера: снабженные видеосистемами роботы «Пума», «Юнимейт», «Ауто-плейс»,

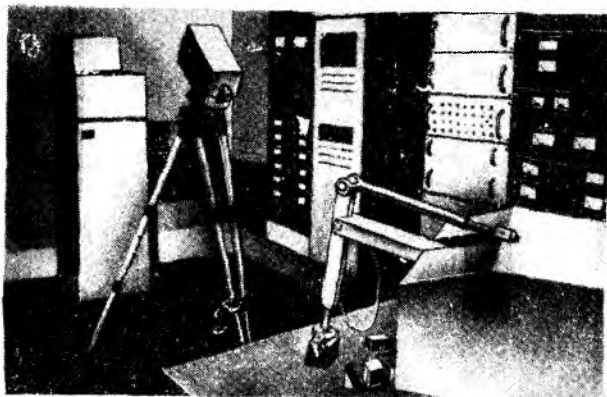


Рис. 1.10. Экспериментальный робот «Хивип» Центральной научно-исследовательской лаборатории фирмы «Хита-чи» (Япония) для механической сборки простых объектов по чертежу

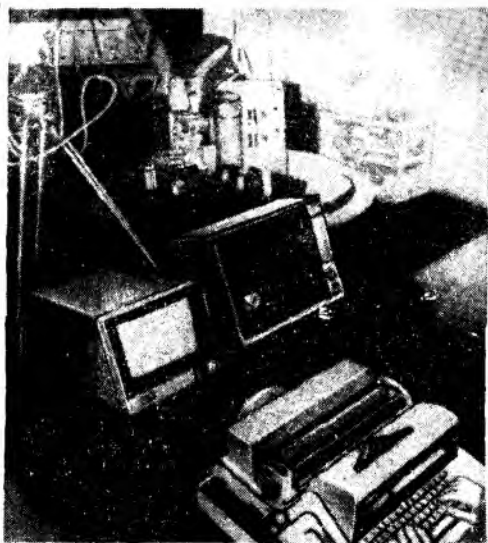


Рис. 1.11. Экспериментальный электромеханический робот ЭТЛ-1 электротехнической лаборатории ЭТЛ (Япония)

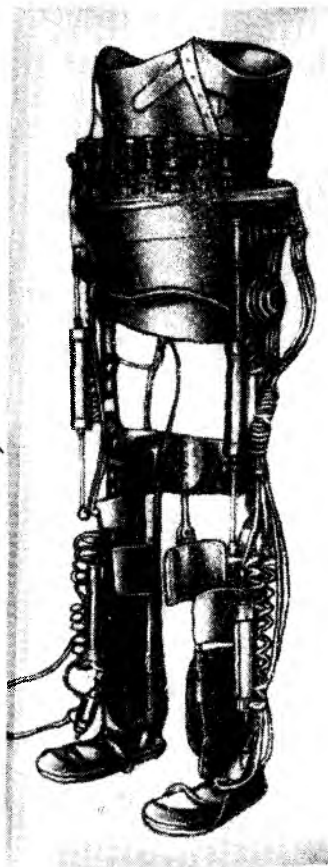


Рис. 1.12. Экзоскелетон

**1.2. Распределение парка промышленных роботов в мире
по областям применения (в %)**

Страна	Сварка	Окраска, отделка	Сборка	Литье	Загрузо-разгрузочные операции	Прочее
Япония	14,6	1,7	31	7,4	45,3	—
США	40	12	1,0	20,0	20	7
ФРГ	55,6	15,8	5	0,6	23	—
Швейцария	10	10	20	10	50	—
Англия	28,8	18,6	1,3	—	39,6	11,7
Дания	2,9	6,3	4,6	11,5	74,7	—
Финляндия	6,6	10,8	2,4	8,9	36,6	34,7
Бельгия	42,9	19,0	4,8	—	33,3	—
Голландия	40	40	—	—	20	—
Страны — члены СЭВ	4	6	12	1	60	17
Всего в мире:	15,0	4,3	24,0	7,1	47,0	21,2

ванных изделий, складирование капсул, покрытие глазурью путем окунания, нанесение глазури пульверизатором, шлифовка изделия после обжига, загрузка и разгрузка печей.

2. Стекольная промышленность: загрузка и разгрузка машин.

3. Швейная промышленность: загрузка швейных машин.

4. Деревообрабатывающая промышленность: покрытие лаком, сборка изделий, забивка гвоздей, закручивание винтов.

5. Производство и обработка кожи: загрузка машин.

6. Резинообрабатывающая промышленность: распознавание образцов, манипулирование с шинами.

7. Асбестообрабатывающая промышленность: разрезка, обточка, шлифовка, штукатурка.

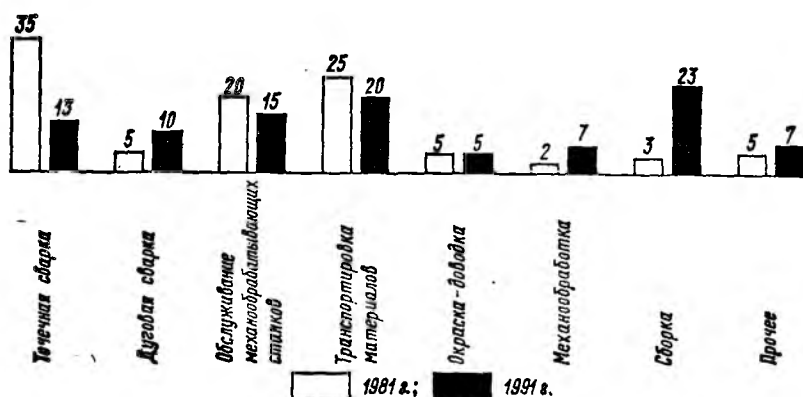
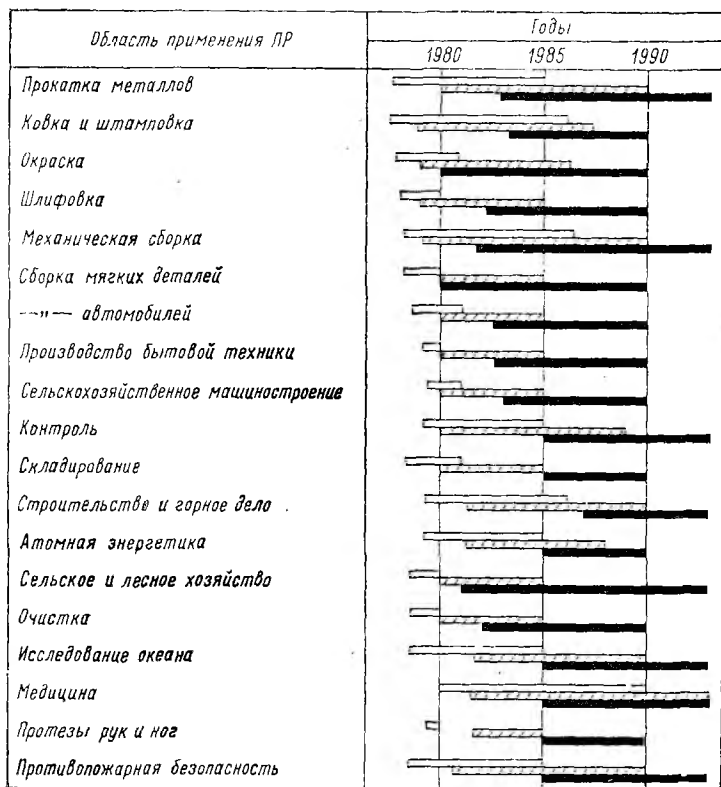


Рис. 1.13. Распределение парка промышленных роботов по областям применения в США (в %) по данным американского Института робототехники [40]

1.3. Прогноз областей применения промышленных роботов в Японии [40]



Условные обозначения:

██████████ — разработка; ▨ — опытная эксплуатация; ██████████ — внедрение

8. Обработка пластиков: загрузка сырья, разгрузка машин.

9. Мясообрабатывающая промышленность: рубка мяса.

Как уже упоминалось во введении, основным направлением применения роботов, которое по существу определяет темпы и проблематику развития современной робототехники в целом, являются гибкие автоматизированные производства, прежде всего в машиностроении и механообработке. Роботы как универсальное гибкое средство для выполнения манипуляционных действий — важный компонент таких производств.

Можно считать, что промышленная история гибкой автоматизации началась в 1955 г. с появлением станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Именно такого типа автоматическое основное технологическое оборудование с быстросменяемыми программами работы и возможностью автоматизации процесса составления самих этих программ по конструкторской документации на изготавливаемое изделие является основой для создания гибких, т. е. быстро перестраиваемых на выпуск новой продукции, производств.

Однако прежде чем реализовать идею гибкой автоматизации, необходим еще целый ряд условий. Этим и объясняется, что первые станки с ЧПУ распространялись очень медленно. За десять лет их доля в общем парке станков в технически передовых странах не достигла и 0,1 %. Ситуация резко изменилась в 1970 г. с появлением второго поколения оборудования с ЧПУ, управляемого непосредственно от ЭВМ. Это можно считать вторым этапом развития идеи гибкой автоматизации. Главным его результатом было появление следующего важнейшего компонента гибкой автоматизации — микропроцессорного управления, что обеспечило резкое снижение стоимости систем ЧПУ. (Если раньше она составляла около 50 % стоимости всего оборудования с ЧПУ, то теперь снизилась до 20 % и одновременно повысилась надежность, без чего также невозможна комплексная автоматизация производства.)

Роботы как другой обязательный компонент гибкой автоматизации появились в промышленности, как мы уже знаем, несколько раньше — в 1962 г. В результате от системы «человек — машина» промышленность смогла перейти к системе «человек — робот — машина» с исключением человека из непосредственного участия в технологическом процессе. Таким образом, появление промышленных роботов — это третий необходимый этап в общем процессе развития гибкой автоматизации.

Следующим, четвертым, этапом явилось создание первых гибких автоматизированных производств, объединивших все перечисленные выше компоненты, а именно: технологическое оборудование с программным управлением, микропроцессоры как универсальное гибкое средство для обработки информации и, наконец, роботы как универсальное гибкое средство для манипуляционных действий, требуемых для выполнения основных технологических операций (сборки, сварки, окраски и т. п.) и различных вспомогательных операций по обслуживанию другого оборудования.

Кроме перечисленных выше составных частей в такие гибкие автоматизированные производства входят автоматизированные склады, транспортные системы и общая система управления.

Сегодня в мире насчитываются уже несколько сотен таких производств (в основном по механообработке). Как показывает опыт, их применение позволяет уменьшить более чем на порядок численность работающих, примерно в пять раз состав оборудования и вдвое-втрое производственные площади, сократить на порядок цикл обработки и обеспечить трехкратную работу оборудования.

Распространение и совершенствование гибких автоматизированных производств — важнейший этап развития современного производства во всем мире. И именно он определяет сегодня основное значение и развитие робототехники.

Дальнейшим этапом реализации идеи гибких автоматизированных производств является включение в их состав систем автоматизированной технологической подготовки производства, объединенных общей системой управления и планирования производства в целом.

Как было показано выше, роботы получили основное применение в машиностроении. Однако одновременно они начинают все более широко проникать и в другие отрасли хозяйства, включая горное дело, металлургию, строительство, транспорт, легкую и пищевую промышленность, сельское хозяйство, сферу обслуживания, освоение океана и космоса.

Почти во всех технически развитых капиталистических странах созданы национальные ассоциации по робототехнике. В ряде стран (Японии, Франции, ФРГ, Италии, Англии и др.) имеются финансируемые государством национальные программы по этой проблеме.

Регулярно проводятся международные симпозиумы и выставки роботов. Быстро растет объем информации по робототехнике. Так, перечень патентов только США, Японии и Англии за последние три года занимает более 400 страниц. Выходят все новые специализированные международные журналы.

1.3. РАЗВИТИЕ РОБОТОТЕХНИКИ В СССР

Первые серьезные результаты по созданию и практическому применению роботов в СССР относятся к 60-м годам. В 1966 г. в институте ЭНИКмаш (г. Воронеж) был разработан автоматический манипулятор с простым цикловым управлением для переноса и укладки металлических листов. Первые промышленные образцы современных промышленных роботов с позиционным управлением были созданы в 1971 г. (УМ-1, «Универсал-50», УПК-1).

В 1968 г., как уже упоминалось, был создан первый управляемый от ЭВМ подводный автоматический манипулятор. В 1971 г. в Ленинградском политехническом институте был создан экспериментальный образец интегрального робота, снабженного развитой системой очувствления, включая техническое зрение и речевое управление (рис. 1.14) [34]. В том же году в Ленинграде состоялся первый Всесоюзный семинар по роботам, управляемым от ЭВМ.

Начиная с 1972 г. работы в области робототехники приняли плановый характер в масштабе страны. В 1972 г. в Постановлении Госкомитета СССР по науке и технике была сформулирована проблема создания и применения роботов в машиностроении как государственной важной задачи и определены основные направления ее решения. В следующем году была утверждена первая программа работ по этой проблеме, которая охватила основные отрасли промышленности и ведомства, включая Академию наук СССР и высшую школу. В соответствии с этой программой в девятой пятилетке, т. е. к 1975 г., было создано свыше 30 серийно пригодных типов промышленных роботов, в том числе универсальных (для обслуживания станков, прессов, гальванического и литейного производств, для нанесения покрытий и точечной сварки), на пневмо-, гидро- и электроприводах, стационарных и подвижных.

В десятой пятилетке эта работа была продолжена на основе новой пятилетней программы. В результате было создано более 100 марок промышленных роботов. Одновременно были начаты

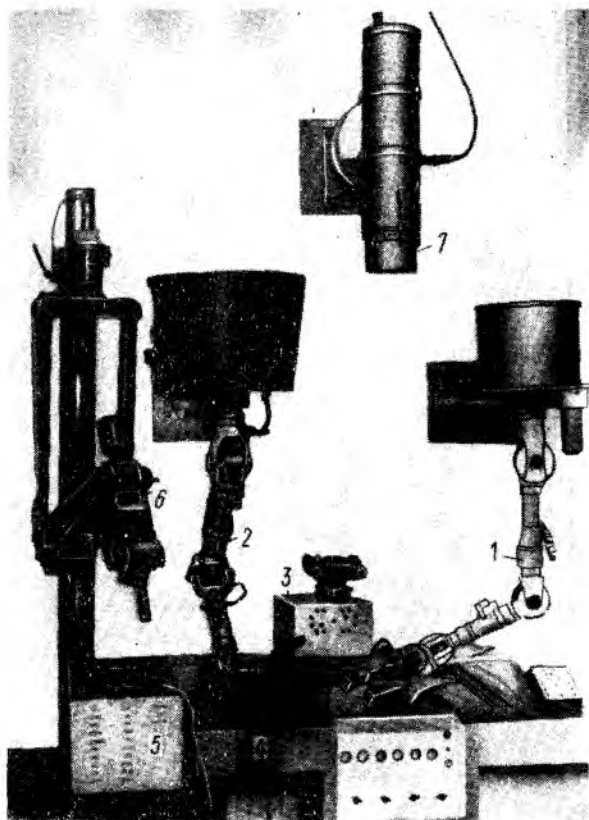


Рис. 1.14. Экспериментальный интегральный робот ЛПИ-2:

1, 2 — электромеханические манипуляторы со съёмными осязательными схватами; 3 — ультразвуковой дальномер; 4 — осязательный стол с фотодиодными линейками; 5 — речевое командное устройство; 6 — задающая рукоятка для ручного управления; 7 — телевизионная камера

работы по унификации и стандартизации промышленных роботов на основе соответствующей программы Госстандарта СССР.

Фундаментальные и поисковые работы в области робототехники были развернуты на основе соответствующих программ Академии наук и высшей школы, которые тесно увязаны с комплексной программой Госкомитета СССР по науке и технике, а часть их заданий непосредственно входит в эту программу или имеет продолжение в виде опытно-конструкторских работ.

Для полноты характеристики организации работ в стране по рассматриваемой проблеме необходимо упомянуть о региональных программах внедрения и кооперированного производства промышленных роботов, которые обычно входят в состав комплексных планов экономического и социального развития регионов и создаются

с целью решения региональных проблем, прежде всего проблемы трудовых ресурсов.

Следующим этапом развития отечественной робототехники явилась организация в десятой пятилетке серийного производства роботов на основе Постановления Совета Министров СССР от 22 июля 1974 г. На необходимость развертывания этих работ ранее было указано в решении XXV съезда КПСС. В результате в десятой пятилетке были организованы серийное производство более 40 марок промышленных роботов и выпуск первых тысяч этих машин. К концу 1980 г. парк промышленных роботов в стране составил свыше 6000 шт., что существенно превысило плановые задания и находится, например, на уровне парка роботов в США.

Были созданы первые роботизированные участки и линии во всех основных отраслях (прежде всего для штамповки, металлообработки, подъемно-транспортных работ, сборки).

В 1979 г. за создание на базе специальных автоматических манипуляторов (мини-роботов) комплексно-автоматизированного цеха сборки механизмов наручных часов на Петродворцовом часовом заводе (г. Петродворец под Ленинградом) была присуждена одна из первых в области робототехники Государственных премий.

Параллельно с совершенствованием созданных роботов и организацией их серийного производства были развернуты поисковые работы по различным аспектам этой комплексной проблемы, координируемые указанными выше программами Госкомитета СССР по науке и технике, Академии наук СССР и высшей школы, которые совместно с заданиями Постановления Совета Министров СССР по серийному производству роботов составили единую комплексную программу развития отечественной робототехники на десятую пятилетку.

С 1981 г., т. е. с начала одиннадцатой пятилетки, отечественная робототехника вступила в новый этап своего развития, цели которого отражены в постановлении ЦК КПСС «О мерах по увеличению производства и широкому применению автоматических манипуляторов в отраслях народного хозяйства в свете указаний XXV съезда КПСС». Этот этап широкого внедрения промышленных роботов и манипуляторов должен принести ощутимый экономический и социальный эффект в масштабе всей страны.

Наряду с развитием работ по широкому внедрению роботов в машиностроении вплоть до создания комплексно-автоматизированных цехов и заводов в указанном Постановлении ЦК КПСС поставлена новая ответственная и не менее важная задача, направленная на развертывание работ по внедрению роботов в немашиностроительные отрасли, прежде всего в горную и металлургическую промышленность, строительство, сельское хозяйство, легкую и пищевую промышленность, транспорт.

Общее количество роботов и манипуляторов, используемых в этих отраслях, пока невелико и составляет около 10—15 % парка страны. В подавляющем большинстве это манипуляторы с ручным управлением. Для решения поставленной задачи потребуется создать

целый ряд новых специальных типов роботов, в том числе работающих в особо тяжелых условиях, с увеличенной рабочей зоной, повышенной грузоподъемностью и адаптивным управлением.

С 1980 г. на ВДНХ функционирует постоянно действующая выставка промышленной робототехники, где демонстрируются лучшие образцы отечественных промышленных роботов и манипуляторов совместно с работающим с ними другим технологическим оборудованием.

Первые промышленные роботы второго поколения со средствами оучувствления начали применять в отечественной промышленности на сборочных операциях в приборостроении с 1980 г. [35]. Первый промышленный робот с техническим зрением (и микропроцессорным управлением) МП-8 создан в 1982 г. [32].

В одиннадцатой пятилетке продолжена работа по подготовке инженерно-технических кадров в области робототехники. В 1975 г. впервые был начат выпуск инженеров по этой специальности в Ленинградском политехническом институте в порядке переподготовки с отрывом и без отрыва от производства. Затем был организован ряд специализаций по робототехнике в рамках существующих специальностей. В 1981 г. была введена новая специальность инженера-электромеханика «Робототехнические системы» и организована их подготовка в ряде ведущих вузов страны.

В одиннадцатой пятилетке началась подготовка специалистов по робототехнике в техникумах и ПТУ.

Начиная с 1978 г. в СССР регулярно раз в два года проводятся Всесоюзные совещания по робототехнике (до этого с 1971 г. проводились Всесоюзные симпозиумы). С 1976 г. выходят периодические сборники «Робототехника» (издание Минвуза РСФСР), а с 1977 г. — «Промышленные роботы» (ленинградское отделение издательства «Машиностроение»). С 1981 г. ВИНТИ издает реферативный журнал «Промышленные роботы и манипуляторы», а с 1982 г. — экспресс-информацию «Робототехника».

В одиннадцатой пятилетке получили значительное развитие начавшиеся еще раньше совместные работы в области робототехники стран — членов СЭВ. Стали складываться международная кооперация и специализация социалистических стран в этой области, основанные на совместно разработанной общей концепции развития робототехники. Этапным моментом в этом интеграционном процессе явилось заключение в 1982 г. между странами — членами СЭВ Генерального соглашения о многостороннем сотрудничестве по разработке и организации специализированного и кооперированного производства промышленных роботов, а также создание Совета Главных конструкторов по промышленной робототехнике стран — членов СЭВ.

ГЛАВА 2

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЧЕЛОВЕКА

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С самого начала своего зарождения и до настоящего времени образцом для робототехники являются манипуляционные возможности живых организмов и прежде всего, человека, особенно его рук. Созданные на сегодня роботы еще очень далеки по своим основным характеристикам (энергетическим, информационным, по управляемости, надежности, компактности и т. д.) от присущих человеку и высшим животным. Поэтому живая природа для робототехники еще долго будет являться источником идей и образцом для подражания и сравнения.

Кроме того, существует серьезная проблема создания технических средств, заменяющих отдельные подвижные части организма человека, т. е. проблема протезирования. Наконец, в ряде применений средства робототехники должны действовать в органическом единстве с человеком. В связи с этими обстоятельствами также требуется знать, как организованы движения в живой природе и как они управляются. В настоящей главе даны сведения по этому вопросу применительно прежде всего к человеку и его главному манипуляционному средству — руке, излагаемые с позиций современной робототехники.

В приложениях приведены некоторые сведения об эволюции движения в живой природе и об устройстве системы управления движением человека.

2.2. ДИНАМИЧЕСКИЕ УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Система управления движениями тела человека является иерархической, и в ней можно выделить следующие пять уровней управления: (см. рис. П.2.8): *стратегический уровень* (принятия решений о выполнении определенных действий на основе мотиваций);

тактический уровень;

три динамических уровня (исполнения движений), т. е. управление с использованием внешней информации, рефлекторное связанное управление несколькими звеньями тела, рефлекторное управление отдельными звеньями.

Начнем рассмотрение этих уровней снизу. Два нижних динамических уровня управления — это управление по жестким (врожденным) программам, т. е. *уровни рефлекторного управления*. Осуществляются они через спинной мозг, но в них участвует и центральная нервная система в виде нижних отделов мозжечка (обеспечение тонуса мышц и позы) и переднего мозга (связанное программное управление).

Рефлекторное управление отдельным звеном (суставом). На рис. 2.1 показан контур управления одной мышцей. Ее устройство управления, реализованное в сегменте спинного мозга, которому подчинен сегмент тела, содержащий эту мышцу, состоит из трех частей: слоя α - и γ -мотонейронов, управляющих мышцей, мотонейронного пула сенсорного слоя, связанного с внутренними рецепторами мышцы и сухожилий, и расположенных между ними слоев, осуществляющих 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 движением отдельного сустава. При этом устройства управления мышцами перекрестно связаны друг с другом сигналами позиционной обратной связи по длине мышцы: сигналы от этих рецепторов (мышечных веретен) сокращаемой мышцы помимо воздействия по цепи обратной связи на α -мотонейроны своей мышцы, обеспечивая ее сжатие в соответствии с заданием, одновременно воздей-

Связанное управление двумя конечностями осуществляется путем управления со стороны одного сегмента спинного мозга определенными суставами обеих конечностей (внутрисегментарный рефлекс). Помимо сегментов спинного мозга в этом уровне управления участвуют наиболее древние области переднего мозга, в которых на основании информации, получаемой от внутренних рецепторов, создается общая картина положения всех частей тела и вырабатывается двигательная реакция, которая подается в спинной мозг.

Этот уровень управления в основном исполнительный, отрабатывающий 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 также нижние отделы мозжечка.

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

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

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

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

Примером ориентационных движений являются движения глаз с целью слежения за объектами внешней среды с учетом таких возмущений, как перемещение этих объектов, движение тела, изменение положения головы, изменение параметров объектов (яркости, контрастности и т. п.). Эти движения осуществляют глазодвигательной системой, которая содержит три пары мышц-антагонистов.

Локомоции (ходьба, бег и т. д.), 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 корректирования этих программных движений по сигналам от внутренних рецепторов. Вышестоящие уровни управления корректируют затем локомоции уже с учетом тех внешних условий движения, которые определяются внешними рецепторами, включая перемещение и изменение целей.

Манипуляционные движения отличаются наибольшей ролью в них внешних рецепторов и мотиваций. В коре больших полушарий головного мозга имеются места (сенсомоторная кора), за которыми закреплены определенные сегменты тела и которые осуществляют управление их мышцами на основе получаемой внешней и внутренней информации. Площадь этих мест тем больше, чем сложнее задача управления соответствующим сегментом тела.

В целом все динамические уровни управления движением, действуя совместно, реализуют требуемые движения в виде комбинации следующих трех составляющих: грубые и быстрые рефлекторные (программные) движения без обратной связи по внешней информации (первый и второй уровни);

такие же стереотипные движения, но комбинируемые и корректируемые в функции от внешней информации (экстрапирамидный путь третьего уровня);

наиболее тонкие и точные движения, выполняемые непосредственно в функции от текущей внешней информации (пирамидный путь третьего уровня).

Последний вариант управления требует максимального участия головного мозга и используется только в тех случаях, когда заданное движение не удается свести

к рефлекторным. Кроме того, в случае необходимости он резервирует предыдущие варианты, а также участвует в отработке новых программ (формирование новых рефлекторных дуг) наряду с экстрапирамидным путем. Такой процесс обучения можно представить следующим образом. Вначале требуемое новое движение многократно осуществляется путем управления мышцами непосредственно от высших двигательных центров. Одновременно запоминаются и усредняются синтезированные при этом управляющие воздействия на отдельные мышцы. В результате формируется готовая двигательная реакция на задание сверху и, соответственно, верхние уровни освобождаются от управления отдельными мышцами, передавая эту функцию нижним уровням. Эти вновь приобретенные в порядке обучения программы кранятся и реализуются третьим уровнем управления.

Описанное иерархическое управление движениями наряду с такими очевидными достоинствами, как максимальное быстрое действие реакций (отдернуть руку и т. п.), возможность обучения и разгрузка вышестоящих уровней для решения наиболее сложных задач, имеет и серьезные недостатки. При таком управлении движения зачастую получаются неоптимальными и не используются все возможности двигательной системы организма.

Путем управления мышцами непосредственно сверху можно не только получать лучшее качество движений, но и осуществлять принципиально новые типы сложных движений, не реализуемых с помощью экстрапирамидного пути, где этому препятствует набор врожденных и приобретенных стереотипных программных движений. Именно поэтому часто при освоении новых типов движений на производстве и в спорте главным препятствием является преодоление ранее сложившихся рефлекторных движений. (Известно, как трудно двумя руками одновременно выполнять различные движения — например, одной рукой хлопать себя по голове, а другой гладить по животу — хотя «технические» возможности рук явно это позволяют.)

2.3. ТАКТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

На этом уровне составляется план достижения той очередной цели, которая определяется для него 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 самых высших животных существует в зачаточном состоянии.

Тактические подцели, которые намечаются на этом уровне и под его руководством реализуются, требуют осмысленных движений. К ним относятся прежде всего движения с предметами для воздействия на внешнюю среду с целью ее изменения нужным и заранее спрогнозированным образом. Примерами подобных действий могут быть такие производственные операции с применением орудий труда, как работа столяра, сварка, сборка, а также вязание спицами, работа хирурга, письмо. Такими же осмысленными действиями, но без предметов являются, например, массаж и речь.

Тактический уровень — это высший уровень управления для подобных целенаправленных движений, реализующий их путем разбиения на более простые движения, которые затем уже «бездумно» исполняются нижележащими исполнительными уровнями. В зависимости от того, какая при этом необходима информация, управляющие воздействия с тактического уровня идут на различные нижние уровни. Например, движения хирурга, поскольку требуется зрительная информация, реализуются через третий уровень динамического управления, вязание спицами, где необходима только внутренняя информация, — через второй уровень, а письмо — в значительной степени прямо через первый уровень.

До выбора тактики достижения заданной сверху цели и составления соответствующего плана действий требуется знать внешнюю обстановку и состояние организма. Для этого служат модели внешней среды и самого тела в ней, которые формируются и непрерывно корректируются на основе всей полученной сенсорной информации. При этом для каждой конкретной цели, заданной сверху (со стратегического уровня), эти модели преобразуются, ориентируются на эту цель путем выделения наиболее существенных для ее достижения особенностей и деталей.

В соответствии с задачами, решаемыми на этом уровне, используемая здесь сенсорная информация предварительно перерабатывается таким образом, что содержит уже не количественные, а качественные, т. е. смысловые, характеристики объектов. Иными словами, здесь используются не метрика предметов и действий с ними (размеры, расстояния, масса и т. д.), а их топология и понятия (буква, стул и т. п.).

В приложении показано, как происходят отображение и последовательное преобразование зрительной и другой сенсорной информации слоями нейронов в соответствующих сенсорных областях коры с целью выделить наиболее существенные для данного организма объекты и признаки. По существу эти многослойные топологически увязанные отображения являются моделями среды и тела, основанными на определенном виде сенсорной информации. Эти частные модели объединяются в ассоциативных областях коры, в слоях которой производятся затем указанные выше целенаправленные преобразования этих моделей с переходом от непосредственных чувственных образов к более абстрактным. В ходе составления тактического плана достижения поставленной конкретной цели его варианты «пронгравываются» на модели 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.

Выше было указано, что уровень тактического управления ответствен за целенаправленные осмысленные движения. Однако это не означает, что все такие движения осуществляются сознательно по непосредственным командам головного мозга. Как раз 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.

2.4. СТРАТЕГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Это высший уровень во всей иерархической системе управления движением. Здесь определяются цели и осуществляется контроль за реализующими их действиями, включая оперативную корректировку этих действий и самих целей в зависимости от эффективности процесса их достижения, внешних и внутренних условий. Наконец, после завершения действий здесь оцениваются достигнутые результаты. Этот уровень и сам непосредственно участвует в реализации наиболее совершенных и новых движений человека. Примером их являются речь, письмо.

Выбор целей поведения осуществляется исходя из потребностей с учетом сравнительной оценки их важности, степени реальности и возможного качества их удовлетворения. Потребности проявляются в виде чувств (биологических и социальных, врожденных и приобретенных, инициированных извне или возникших в самом организме — голод, опасность, продолжение рода, любопытство, свободолюбие, справедливость и т. д.). Предельно сильным проявлением чувства является эмоция (гнев, ужас, восторг и т. п.).

Существующие в данный момент потребности поступают в виде чувств в ассоциативные области коры больших полушарий головного мозга из лимбической системы (см. приложения) в качестве мотиваций последующих действий. Там из них выбирается важнейшая, т. е. принимается решение о ближайшей цели поведения, которая затем реализуется с помощью последующих уровней управления движением.

Процедуру выбора доминирующей мотивации можно представить следующим образом. Сигналы об отдельных потребностях вызывают из памяти в ассоциативные области коры соответствующие алгоритмы (модели действий, направленных на их удовлетворение). Последние, как и сенсорные модели, представляют собой возбужденные зоны нейронных слоев, которые отображают соответствующие управляющие воздействия на нижележащие уровни управления. Из всех этих порой противоречивых вариантов управления, возбужденные зоны которых при этом 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

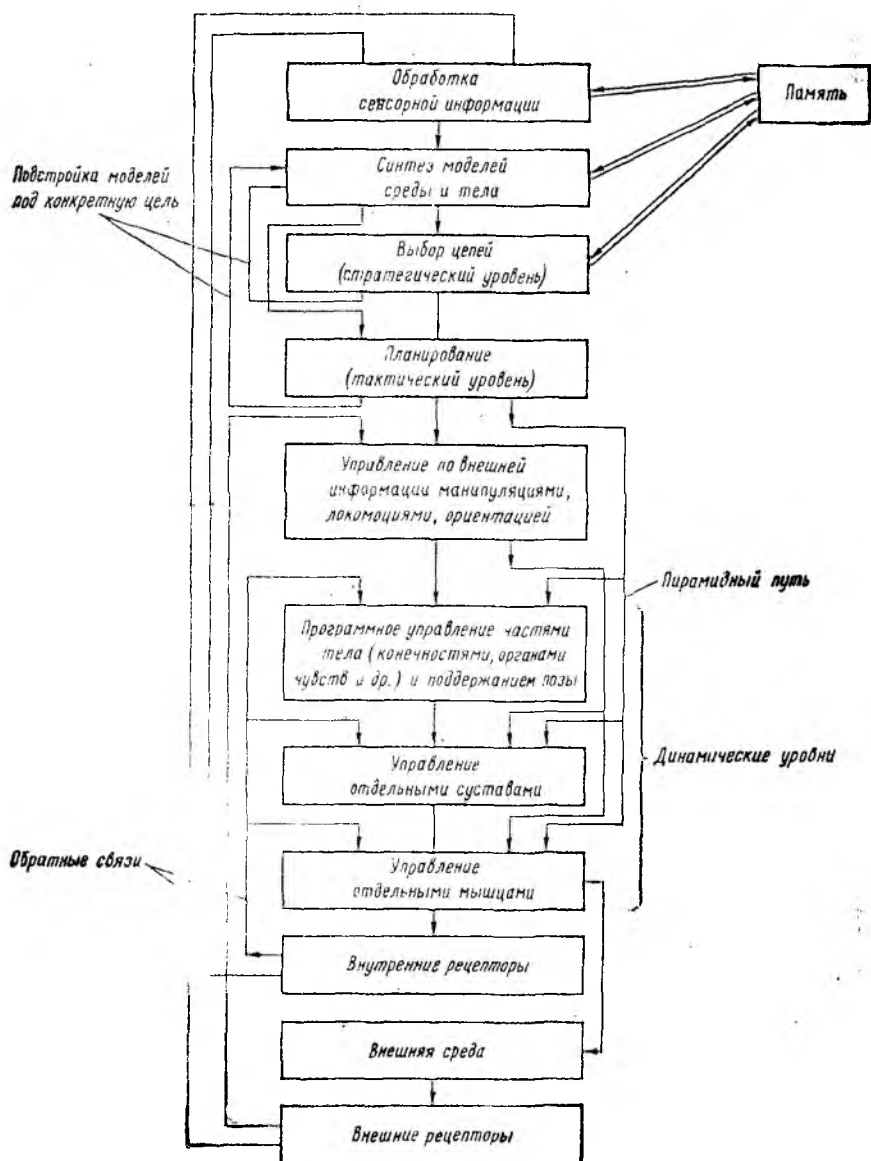


Рис. 2.3. Общая функциональная схема нерархической системы управления движениями человека

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. д.).

В течение времени, когда в ассоциативной области доминирует определенная возбужденная зона, эта зона является временным центром управления поведением организма вплоть до достижения сформированной цели, т. е. до удовлетворения соответствующей основной потребности или до подавления этого центра появившейся более обширной зоной возбуждения, требующей других действий.

Критерием оптимальности при оценке степени достижения поставленной цели является чувство удовлетворения соответствующей основной потребности.

На стратегическом уровне выбранная основная цель может быть разбита на отдельные подцели, которые последовательно по мере их достижения выдаются на тактический уровень как самостоятельные цели. Работа тактического уровня, как упоминалось выше, 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 разбивается на более мелкие тактические подцели.

Эффективность работы стратегического уровня как наивысшего в иерархии управления действиями организма характеризует уровень его интеллекта в целом. Она определяется степенью оптимальности принимаемых решений, степенью учета при этом различных факторов, могущих влиять на эти решения, и длительностью охватываемого периода времени [3].

Интеллектуальные возможности организма обусловлены прежде всего объемом памяти и эффективностью ее использования. Основным свойством интеллекта является умение использовать и упорядочивать получаемую от рецепторов информацию, в том числе для построения моделей внешней среды, прогнозирования ее изменений, принятия на этой основе решений и самоусовершенствования.

На основании рассмотренных выше уровней управления движением на рис. 2.3 дана общая функциональная схема иерархической системы управления движениями человека. Здесь в частности показаны прямые управляющие воздействия сверху вниз, минуя отдельные промежуточные уровни (пирамидный путь), каналы обратной связи, идущие вверх на входы отдельных уровней управления, и воздействия на модели среды и тела со стороны стратегического и тактического уровней, осуществляющие управление этими моделями для подстройки их под очередную конкретную задачу и для прогнозирования результатов планируемых действий.

Завершая рассмотрение этой системы управления, еще раз обратим внимание на то, что ее нельзя сводить к простому иерархическому управлению сверху вниз, когда каждый уровень реализует порученную ему операцию путем разбения ее на более мелкие типовые операции, находящиеся в арсенале следующего уровня, и последовательной выдачи ему 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.

Основными особенностями материальной реализации рассмотренной системы являются ее исключительная многоканальность и избыточность. Выявление информации, ее обработка, запоминание и преобразование в мышечные усилия осуществляются по тысячам и миллионам параллельно действующим каналам из сложно 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, температурная и т. п. — передается тактированию 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 быстродействие и надежность, не достижимые пока в технических системах.

ГЛАВА 3

УСТРОЙСТВО РОБОТОВ

3.1. СОСТАВ, ПАРАМЕТРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТОВ

Состав роботов. Как было показано во введении (см. рис. В.1), робот как машина состоит из двух основных частей — исполнительных устройств и устройства управления. В свою очередь исполнительные устройства включают одно или несколько манипуляционных устройств (обычно в виде механических манипуляторов), которые являются отличительным признаком роботов как нового типа машин в целом, и устройство передвижения, имеющееся только у подвижных роботов.

Классификация роботов по назначению. Для того чтобы ознакомиться с характеристиками роботов, рассмотрим их классификацию по основным показателям, которые определяют тип робота. Первым таким показателем, в соответствии с которым все роботы делятся на наиболее крупные группы, является их назначение, т. е. область применения. Перечень основных областей применения роботов дан в параграфе 1.2. Как там было показано, сфера использования роботов непрерывно расширяется и соответственно растет перечень типов роботов, определяемых их основным назначением.

Сегодня основным таким типом являются промышленные роботы (ПР), которые предназначены для применения в промышленности и составляют 85—90 % всего парка роботов в мире. В свою очередь промышленные роботы (как и роботы других назначений) делятся на ряд типов более узкого назначения (например, робот окрасочный, сварочный, транспортный, для обслуживания станков, прессов, литейных машин и т. д.). При этом все промышленные роботы вне зависимости от их конкретного основного назначения делятся по степени универсальности применения на три типа: универсальные, специализированные и специальные.

Универсальные роботы предназначены для выполнения разных операций и в том числе для работы совместно с различными видами оборудования. *Специализированные роботы* имеют более узкое назначение и осуществляют одну определенную операцию (например, сварку, окраску, обслуживание оборудования определенного вида), а *специальные роботы* выполняют только одну конкретную операцию (например, обслуживают конкретную модель технологического оборудования).

По виду технологических операций промышленные роботы подразделяются на роботы, осуществляющие основные технологические операции, и роботы, выполняющие вспомогательные технологические операции по обслуживанию технологического оборудования. Соот

ветственно первые роботы можно назвать основными, а вторые — вспомогательными. Основные роботы относятся к основному технологическому оборудованию, а вспомогательные — к средствам автоматизации.

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

тип приводов робота,
его грузоподъемность,
количество манипуляторов,
тип и параметры их рабочей зоны,
подвижность и способ размещения,
исполнение по назначению.

Рассмотрим эти показатели последовательно.

Типы приводов, используемых в роботах, делятся на электрический, гидравлический и пневматический. Часто их применяют в комбинации; например, в звеньях манипулятора большой грузоподъемности используют гидравлический привод, а в его захватном устройстве — более простой и маломощный пневматический привод, достаточный, однако, для удержания объектов манипулирования. Приводы роботов рассмотрены в гл. 4.

Грузоподъемность робота обуславливается грузоподъемностью его манипуляционных устройств (манипуляторов), при нескольких манипуляторах — грузоподъемностью наиболее мощного из них. В свою очередь грузоподъемность манипулятора определяется массой перемещаемых им объектов и в зависимости от назначения робота может составлять от единиц грамм (например, у роботов, применяемых в микроэлектронике) до нескольких тысяч килограмм (например, у транспортных и космических роботов).

Промышленные роботы по грузоподъемности делятся на сверхлегкие — до 1 кг, легкие — свыше 1 до 10 кг, средние — свыше 10 до 200 кг, тяжелые — свыше 200 до 1000 кг, сверхтяжелые — свыше 1000 кг.

Количество манипуляторов у роботов в большинстве случаев ограничено одним (одноманипуляторные, или однорукие, роботы). Однако в зависимости от назначения существуют конструкции роботов с двумя, тремя и четырьмя манипуляторами (соответственно двух-, трех- и четырехманипуляторные, или четырехрукие, роботы). Обычно манипуляторы робота выполняют одинаковыми, но имеются конструкции роботов с разными манипуляторами. Например, существуют промышленные роботы для обслуживания прессов холодной штамповки с двумя разными манипуляторами: один основной — для взятия заготовки и установки ее в пресс и другой упрощенной конструкции — для выполнения более простой операции сталкивания готовой детали в бункер.

Тип и параметры рабочей зоны манипулятора робота определяют область окружающего его пространства, в пределах которой робот может осуществлять свои манипуляционные передвижения, т. е. при неподвижном основании.

Рабочая зона манипулятора — это пространство, в котором находится его рабочий орган при всех возможных положениях звеньев манипулятора. Форма рабочей зоны определяется, во-первых, *типом системы координат*, в которой осуществляется движение рабочего органа манипулятора, — прямоугольная, цилиндрическая, сферическая, угловая (ангулярная) и различные их комбинации. Во-вторых, она зависит от числа *степеней подвижности* манипулятора. Имеются манипуляторы с числом степеней подвижности более семи, хотя их количество в общем парке роботов не превышает 2 %.

Размер рабочей зоны обусловлен диапазоном перемещений звеньев манипулятора по отдельным степеням подвижности и прежде всего максимальными значениями этих (поступательных и угловых) перемещений (ходом).

Подвижность робота определяется наличием или отсутствием у него устройства передвижения. В первом случае роботы называют *подвижными*, а во втором — *стационарными*. В соответствии с назначением роботов в них применяют устройства передвижения практически всех известных на сегодня типов: от наземных колесных и гусеничных до предназначенных для передвижения в воде, глубинах земли, в воздухе и космосе. Созданы опытные образцы первых шагающих роботов.

По способу размещения стационарные и подвижные роботы бывают *напольными*, *подвесными* (подвижные роботы этого типа обычно перемещаются по поднятому рельсовому пути), *встраиваемыми* в другое оборудование (например, в обслуживаемый станок) и т. д.

Исполнение робота по назначению зависит от внешних условий, в которых он должен функционировать. Различают исполнение *нормальное*, *пылезащитное*, *теплозащитное*, *влагозащитное*, *взрывобезопасное* и т. д.

Классификация роботов по способу управления. Как уже было сказано во введении, роботы могут быть с программным, адаптивным и интеллектуальным управлением.

Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть *непрерывным (контурным)* и *дискретным (позиционным)*. В последнем случае управление движением осуществляют, задавая конечную последовательность точек (позиций) и последующее перемещение по ним шагами от точки к точке без задания и контроля параметров траекторий между этими точками. (Координаты этих точек можно задавать в зависимости от типа конкретного устройства управления в дискретной или непрерывной формах, так же, как и траектории движения при непрерывном управлении.)

Простейшим вариантом дискретного (позиционного) управления является *цикловое*, при котором количество точек позиционирования по каждой степени подвижности минимально, т. е. чаще всего ограничено двумя — начальной и конечной координатами.

К важным параметрам систем управления роботов, определяющим их эксплуатационные возможности, относятся **объем**

памяти устройства управления, типы и количество каналов связи с внешним оборудованием (в том числе и с другими роботами) и с человеком-оператором, а также назначение и способы взаимодействия с оператором. Сюда прежде всего включают способы программирования робота и оперативного участия оператора в реализации движений роботом. Объем памяти устройства управления робота наряду с ее оценкой количеством двоичной информации, которая может быть в нее записана, определяется еще наибольшим числом заносимых в память программ и составляющих их кадров, т. е. групп команд, соответствующих отдельным элементарным движениям робота.

Классификация роботов по быстродействию и точности движений. Эти параметры взаимосвязаны и характеризуют динамические свойства роботов. Быстродействие и точность роботов складывается из их значений для манипуляторов и устройства передвижения. Специфическими и главными в робототехнике являются, конечно, быстродействие и точность манипуляторов.

Быстродействие манипулятора определяется скоростью его перемещения по отдельным степеням подвижности.

Быстродействие роботов общего применения можно разбить на три следующие группы:

малое — при линейных скоростях по отдельным степеням подвижности до 0,5 м/с;

среднее — при линейных скоростях свыше 0,5 до 1 м/с;

высокое — при линейных скоростях свыше 1 м/с.

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

Для значительной части областей применения роботов этот параметр очень важен, так как определяет их производительность. Указанное выше быстродействие современных роботов является пока, безусловно, недостаточным и требуется увеличить его по крайней мере вдвое. Основная трудность здесь связана с известным противоречием между быстродействием и другим не менее важным параметром — точностью.

Точность манипулятора характеризуется результирующей погрешностью позиционирования (при дискретном движении) или отработки заданной траектории (при непрерывном движении).

Чаще всего точность роботов характеризуют абсолютной погрешностью.

Точность роботов общего применения можно разбить на следующие три группы:

малая — при линейной погрешности от 1 мм и выше;

средняя — при линейной погрешности от 0,1 до 1 мм;

высокая — при линейной погрешности менее 0,1 мм.

Подавляющее количество роботов в мире имеет среднюю точность, т. е. погрешность их манипулирования измеряется десятками долями миллиметра. Однако существуют роботы с точностью до единиц микрометров (например, для электронной промышленности и сборки в приборостроении). Погрешность манипулирования робо-

тов, предназначенных для выполнения наиболее грубых, например транспортных, движений, превышает 1 мм.

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

Рассмотренные выше параметры роботов относятся к классификационным, т. е. используются для формирования типажа роботов и, соответственно, их наименований (например, легкий пневматический промышленный робот с цикловым управлением для обслуживания прессов в пластмассовом производстве или окрасочный гидравлический промышленный робот с контурным управлением и т. д.).

Параметры, определяющие технический уровень роботов. Наряду с классификационными параметрами работы характеризуются параметрами, которые обуславливают их технический уровень. К ним относятся и некоторые из рассмотренных выше параметров, которые могут иметь количественное выражение: быстродействие, точность, объем памяти, число каналов связи с внешним оборудованием. Однако если при использовании этих параметров для классификации роботов их разбивают, как было показано выше, на классификационные группы (пять групп грузоподъемности, по три группы быстродействия и точности и т. д.) и тип робота определяют по принадлежности значения данного параметра к определенной такой группе, то сравнительную оценку технического уровня робота производят исходя из конкретных численных значений параметров.

Другими параметрами, характеризующими технический уровень роботов, являются надежность, число одновременно работающих степеней подвижности, время программирования, а также основанные на перечисленных выше параметрах различные относительные и комбинированные 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, относительные оценки габаритных параметров, манипуляционных кинематических и динамических характеристик, управляемости робота, возможностей программирования, экономической эффективности и т. п. Однако эти относительные показатели технического уровня уже не являются паспортными параметрами, используемыми для характеристики конкретных роботов, а служат критериями качества, предназначенными для их оптимизации при проектировании и сравнительной оценке роботов.

3.2. МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОБОТОВ

На сегодня основным типом манипуляционных устройств для роботов служат механические манипуляторы. Они представляют собой разомкнутую кинематическую цепь, составленную из кинематических пар, имеющих одну, реже две степени подвижности с по-

ступательным или угловым перемещением рабочего органа, расположенного на конце манипулятора, и приводов, чаще всего раздельных для каждой степени подвижности.

Степени подвижности манипулятора делятся на *переносные и ориентирующие*. Переносные степени подвижности служат для перемещения объекта манипулирования в пределах рабочей зоны манипулятора, а ориентирующие — для его ориентации.

Теоретически минимально необходимое число переносных степеней подвижности для перемещения объекта манипулирования в любую точку совершенно свободной рабочей зоны равно трем. Однако для расширения манипуляционных возможностей и обеспечения требуемых значений кинематических и динамических параметров манипулятора (реализации более сложных траекторий движения, например, для обхода препятствий, повышения быстродействия и т. п.) манипуляторы обычно снабжают несколькими избыточными переносными степенями подвижности, хотя это, разумеется, существенно усложняет и повышает стоимость робота.

Максимально необходимое число ориентирующих степеней подвижности равно трем. Обычно они реализуются кинематическими парами с угловым перемещением, обеспечивающими поворот рабочего органа манипулятора относительно его продольной и двух других взаимно перпендикулярных осей.

Приводы манипулятора, которые, как уже указывалось, могут быть электромеханическими, гидравлическими и пневматическими, обычно размещают непосредственно в звеньях манипулятора или выносят на его основание с передачей движения на соответствующее звено через различного типа передаточные механизмы.

Место размещения приводов в значительной степени определяет конструкцию манипулятора. Размещение приводов непосредственно в звеньях манипулятора существенно упрощает кинематические связи, что также способствует повышению точности. Недостатком такой компоновки является увеличение массы подвижной части манипулятора. Последнее ведет к снижению его грузоподъемности и динамических параметров. В связи с этим обычно, оптимизируя конструкцию манипуляторов, прибегают к комбинации этих двух вариантов размещения приводов для разных степеней подвижности.

Для снижения мощности приводов широко используют различные устройства уравнивания (см. параграфы 3.5 и 3.6).

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

Манипуляторы, работающие в прямоугольной системе координат (рис. 3.1), имеют рабочую зону в виде параллелепипеда. Здесь осуществляются только поступательные перемещения, и поэтому такая система координат наиболее удобна для выполнения прямолинейных движений. Кроме того, она максимально упрощает программирование робота, так как оно обычно выполняется именно в прямоугольной системе координат, и, следовательно, в этом случае не требуется пересчета программ из одной системы координат в другую.

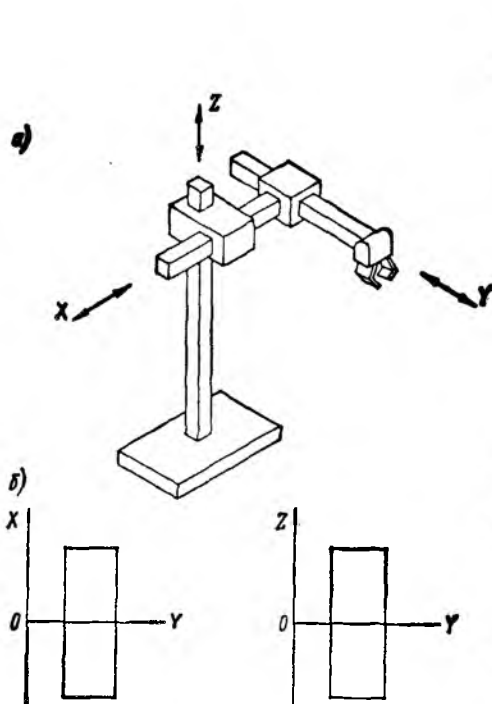


Рис. 3.1. Манипулятор с прямоугольной системой координат (а) и его рабочая зона (б)

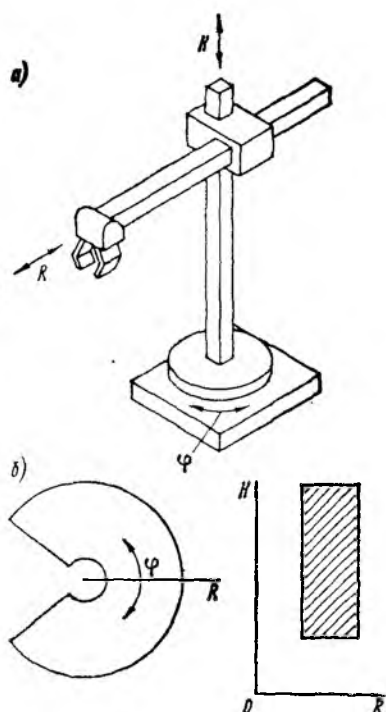


Рис. 3.2. Манипулятор с цилиндрической системой координат (а) и его рабочая зона (б)

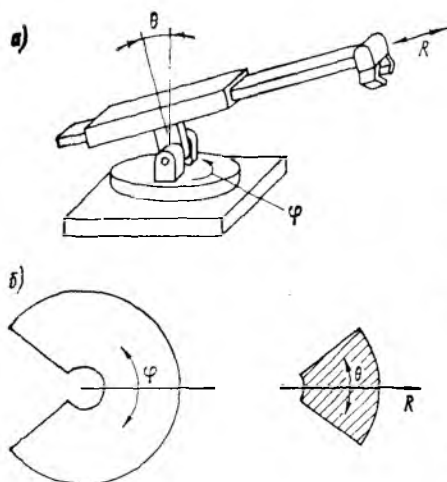


Рис. 3.3. Манипулятор со сферической системой координат (а) и его рабочая зона (б)

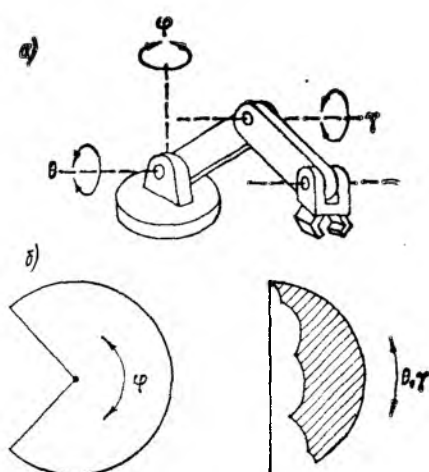


Рис. 3.4. Манипулятор с угловой системой координат (а) и его рабочая зона (б)

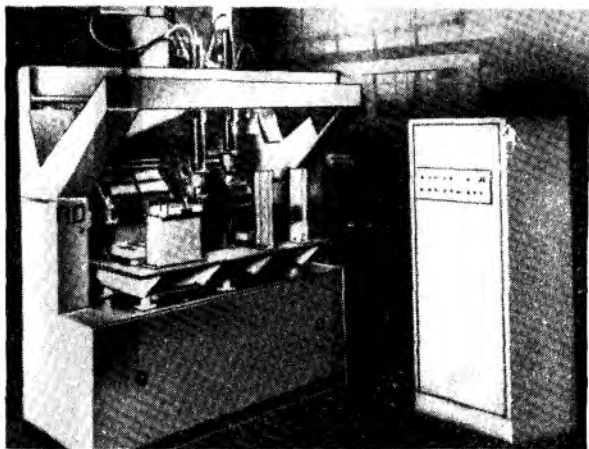


Рис. 3.5. Промышленный робот «Сигма» (Италия), манипуляторы которого работают в прямоугольной системе координат

На рис. 3.5 показан пример промышленного робота, работающего в прямоугольной системе координат.

В манипуляторах, работающих в цилиндрической системе координат (рис. 3.2), наряду с поступательными перемещениями производится одно угловое перемещение (по окружности). Соответственно, рабочая зона имеет форму цилиндра. Показанный ранее на рис. 1.5 робот работает в цилиндрической системе координат.

В случае сферической системы координат (рис. 3.3) осуществляются уже два угловых перемещения и рабочей зоне присуща форма шара. Такую систему координат имеет, например, промышленный робот, показанный на рис. 1.6. Роботы с такой системой координат, как правило, сложнее, чем с цилиндрической системой, однако компактнее.

Приведенный на рис. 3.4 манипулятор с угловой (ангулярной) системой координат производит только угловые перемещения, т. е. все его звенья представляют собой шарниры. (В связи с этим часто такие манипуляторы называют еще шарнирными и антропоморфными.) Роботы с такого типа манипуляторами благодаря возможности последних складываться, практически не выступая за габарит основания робота, обладают наибольшей компактностью, хотя и наиболее сложны в управлении. Такая кинематика свойственна, например, манипуляторам, показанным на рис. 3.6—3.8.

Представленные на рис. 3.1—3.4 манипуляторы имеют всего по три переносных степени подвижности. Однако поскольку манипуляторы реальных роботов в большинстве случаев содержат большее количество звеньев и, соответственно, обладают избыточностью по числу степеней подвижности, в них чаще всего реализуются различные комбинации рассмотренных выше основных типов систем

координат с разным соотношением между числом степеней подвижности с поступательным и угловым перемещениями.

Наряду с дальнейшим совершенствованием механических манипуляторов, заимствованных в робототехнике от конструкций копирующих и других типов манипуляторов с неавтоматическим управлением, ведутся работы по созданию принципиально новых типов манипуляционных устройств. К ним относятся, в частности, устройства для манипулирования предметами с помощью управляемого электромагнитного поля. В настоящее время подобные устройства получили практически применение как для перемещения, так и для ориентации произвольно расположенных предметов [19]. Имеются устройства для сварки электронным лучом, программно управляемым по двум координатам, для сварки, резки и раскроя различных материалов лазерным лучом. Подобные устройства могут заменять также в специальных роботах последние звенья с их рабочим органом.

3.3. СБАЛАНСИРОВАННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ С РУЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В связи с рассмотрением конструкций манипуляторов роботов уместно остановиться на особенностях устройства упомянутых во введении сбалансированных манипуляторов с ручным управлением. Как было указано, они получили широкое применение для выполнения погрузо-разгрузочных операций.

На рис. 3.6—3.8 показаны типовые конструкции таких манипуляторов. В большинстве случаев они имеют угловую систему координат, т. е. шарнирную кинематику. В сбалансированных манипуляторах осуществляется 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 затраты усилий может перемещать взятый груз в рабочей зоне манипулятора.

Рассмотрим устройство сбалансированных манипуляторов на примере отечественного шарнирно-балансирного манипулятора модели ШБМ-150 грузоподъемностью 150 кг, который показан на рис. 3.7. На колонке 1 поворотного устройства 2 расположена приводная головка 3 с электроприводом поворота в вертикальной плоскости звена 4. Звено 4 включает пантаграф, который обеспечивает сохранение вертикального положения звена 5 при поворотах звена 4. На конце звена 5 установлены поворотная головка 6 с рукояткой управления 7, зажим 8 и закрепленное в нем сменное захватное устройство 9.

Сама рычажная система манипулятора сбалансирована с использованием 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

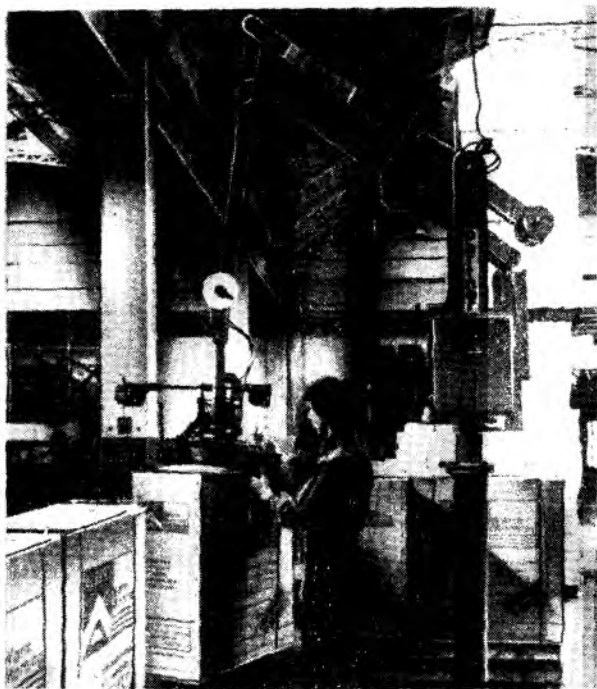


Рис. 3.6. Пневматический сбалансированный манипулятор

перемещения при этом пропорциональна углу поворота рукоятки. При нейтральном положении рукоятки груз останавливается и удерживается в этом положении. В горизонтальной плоскости манипулятор перемещается за счет мускульной силы оператора. Однако усилие здесь требуется небольшое — только на преодоление сил трения и инерции.

Сбалансированные манипуляторы проще и дешевле роботов, их легче внедрить. Хотя они не высвобождают рабочих подобно роботам, но позволяют ликвидировать тяжелый ручной труд. Применение сбалансированных манипуляторов оправдано там, где по каким-то причинам невозможно или пока затруднительно использовать роботов.

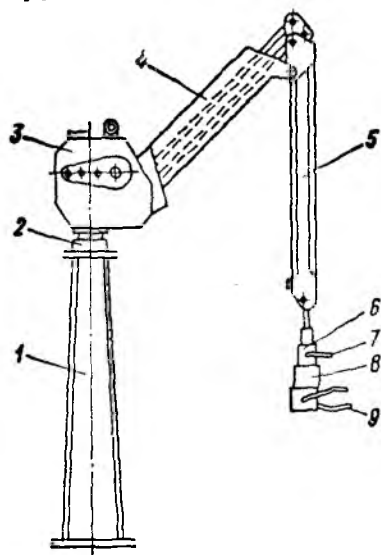


Рис. 3.7. Электромеханический сбалансированный манипулятор ШБМ-150

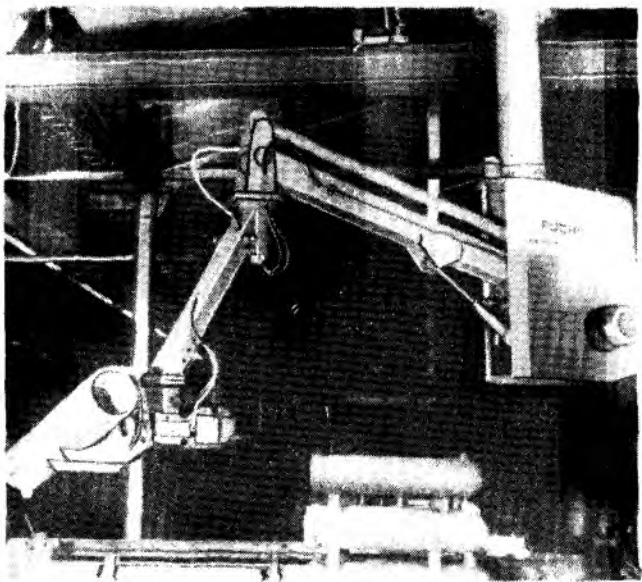


Рис. 3.8. Гидравлический сбалансированный манипулятор

Грузоподъемность выпускаемых сбалансированных манипуляторов — до 2500 кг. Наиболее тяжелые — грузоподъемностью свыше 250 кг — имеют гидравлический привод. При грузоподъемности 100—250 кг используют электропривод, при меньшей грузоподъемности (до 150 кг) сбалансированные манипуляторы снабжают обычно пневматическими приводами.

Одним из перспективных направлений развития сбалансированных манипуляторов является применение автоматизированного управления на базе микропроцессорной техники в виде супервизорного управления (см. параграф 5.3).

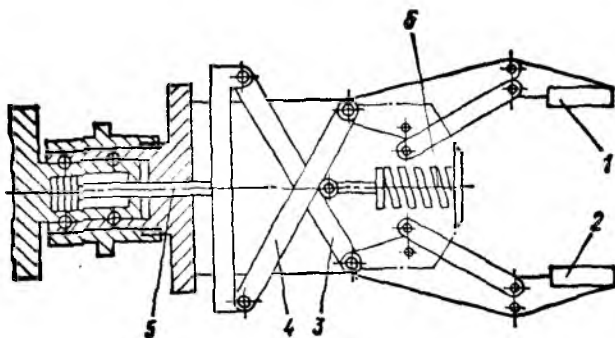
3.4. РАБОЧИЕ ОРГАНЫ МАНИПУЛЯТОРОВ

Рабочие органы манипуляторов служат для непосредственного взаимодействия с объектами внешней среды и делятся на захватные устройства и специальный инструмент. И те, и другие рабочие органы могут быть снабжены средствами очувствления (сенсорными устройствами).

Захватные устройства. Захватное устройство предназначено для того, чтобы взять объект, удерживать его в процессе манипулирования и отпустить по окончании этого процесса. Существуют следующие основные типы захватных устройств: механические устройства-схваты, пневматические и электромагнитные. Кроме того, в связи с большим разнообразием объектов манипулирования разработано большое количество различных комбинаций этих типов захватных устройств и множество специальных захватных устройств, основан-

Рис. 3.9. Двухпальцевый схват:

1, 2 — пальцы (губки);
3, 4 — рычажная передача; 5 — шток пневматического двигателя (пневмоцилиндра); 6 — возвратная пружина



ных на различных оригинальных принципах действия (например, клейкие захватные устройства, накалывающие, использующие аэродинамическую подъемную силу и т. п.).

Схваты — это аналог кисти руки человека. Самые простые двухпальцевые схваты напоминают обычные плоскогубцы, но снабженные приводом. На рис. 3.9 показана конструкция подобного схвата с пневмоприводом. В зависимости от объектов манипулирования применяют схваты с тремя, четырьмя и значительно реже с большим числом пальцев. На рис. 3.10 приведен пример сложного схвата с тремя пальцами, каждый из которых имеет три подвижных звена и может поворачиваться также относительно продольной оси. В связи с простотой совершаемых схватами движений («зажим — разжим») в них широко используются нерегулируемые пневматические и электрические приводы, значительно реже — гидравлические.

На рис. 3.11 показано устройство пневматического схвата с пятью гибкими надувными пальцами. За счет разной жесткости пальцев по сечению при подаче в них сжатого воздуха они изгибаются, захватывая находящиеся в их зоне предметы.

Схваты очувствляют с помощью контактных датчиков (касания тактильных), датчиков проскальзывания, усилия (по одной или нескольким осям) и дистанционных датчиков (ультразвуковых, оптических и др.), выявляющих предметы снаружи вблизи схвата и между его пальцами.

В наиболее распространенном типе вакуумного захватного устройства использованы широко известные вакуумные присоски, которые удерживают объекты за счет разрежения воздуха при его отсосе из полости между присоской и захватываемым объектом. Для захватывания объектов сложной формы применяют вакуумные захватные устройства с несколькими присосками.

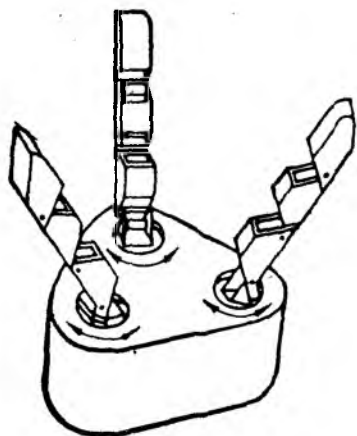


Рис. 3.10. Схват с тремя пальцами

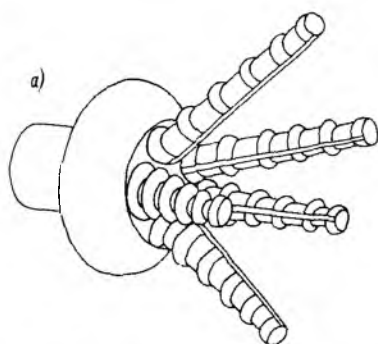
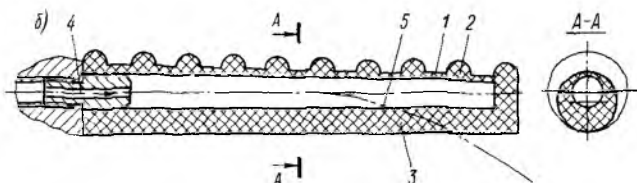


Рис. 3.11. Пневматический схват с пятью гибкими надувными пальцами: а — внешний вид; б — разрезы пальца:

1 — тонкостенная часть; 2 — гофры; 3 — толстостенная часть; 4 — подвод воздуха; 5 — деформация оси пальца при подаче сжатого воздуха



Магнитные захватные устройства также давно известны в технике и широко используются для взятия ферромагнитных объектов. В роботах нашли применение в основном захватные устройства с электромагнитами, но имеются устройства и с постоянными магнитами. (Для освобождения захваченного предмета их обычно снабжают специальными механическими выталкивателями.)

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 перенапряжения 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 и снятие их, перемещение предметов по направляющим и т. п.).

Рабочий инструмент. В тех случаях, когда объектом манипулирования является рабочий инструмент, с помощью которого робот выполняет соответствующие технологические операции (нанесение покрытий, сварку, завинчивание болтов или гаек, зачистку поверхностей и т. д.), этот инструмент, как правило, не берется захватным устройством, а непосредственно крепится к манипулятору вместо него. Часто при этом к инструменту необходимо обеспечить подвод энергии или какого-либо рабочего тела: для окрасочного робота — краски и воздуха к пульверизатору, для сварочного робота — сварочного тока к сварочным клещам при точечной сварке или проволочного электрода, газа и охлаждающей воды при дуговой сварке и т. д. Для этого требуется разработка специальной конструкции всего манипулятора.

3.5. УСТРОЙСТВА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ

Устройства передвижения роботов относят к их исполнительным устройствам. В роботах на сегодня применяют практически все известные на транспорте и в других областях техники способы передвижения. Кроме того, предметом самой робототехники являются шагающие (стопоходящие) транспортные средства, которые образуют ее отдельный раздел (см. параграф 11.5).

В соответствии с назначением робота и с общей классификацией транспортных средств по областям применения устройства передвижения роботов делятся на наземные, подземные, плавающие, подводные, воздушные, космические.

Наземные устройства передвижения состоят из ходовой части и ее приводов. По принципу действия ходовой части эти устройства классифицируют на колесные, гусеничные, на электромагнитной подвеске, на воздушной подушке, шагающие, ползающие и т. д. На рис. 3.12 показан транспортный промышленный робот МП-12Т на колесном ходу. Робот предназначен для внутрицеховых перевозок контейнеров с различным грузом (заготовок, инструмента, отходов производства, готовой продукции). Его трасса задается расположенной на полу светоотражающей или магнитной лентой,

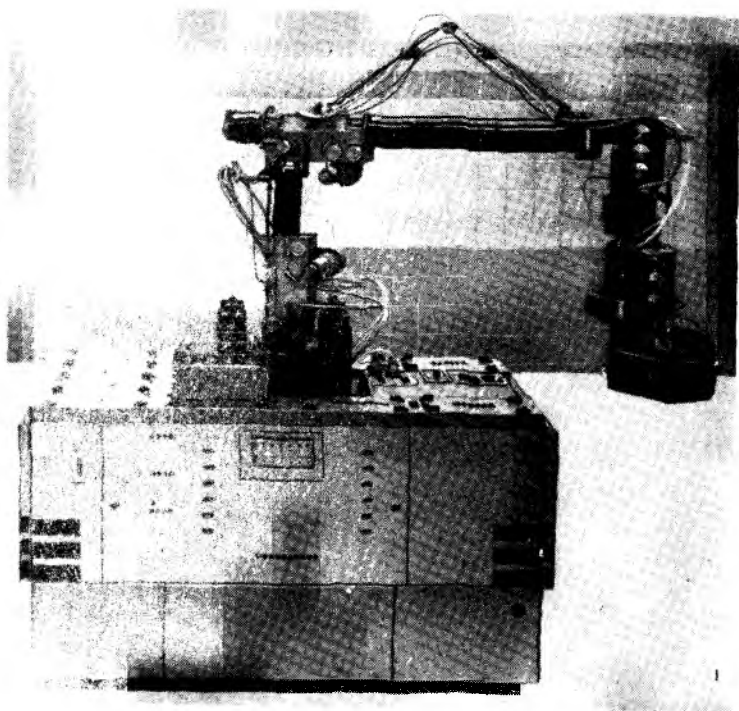


Рис. 3.12. Транспортный промышленный робот МП-12Т

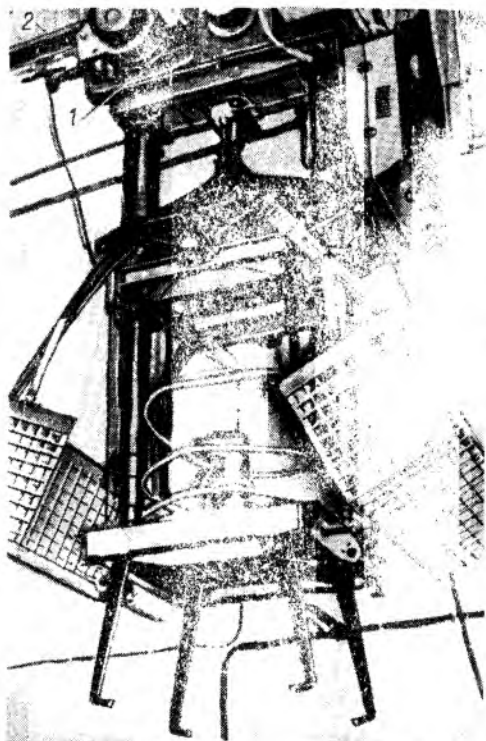


Рис. 3.13. Транспортный промышленный робот ТРТ-1—250 («Спрут-1»);

1 — тележка; 2 — монорельс

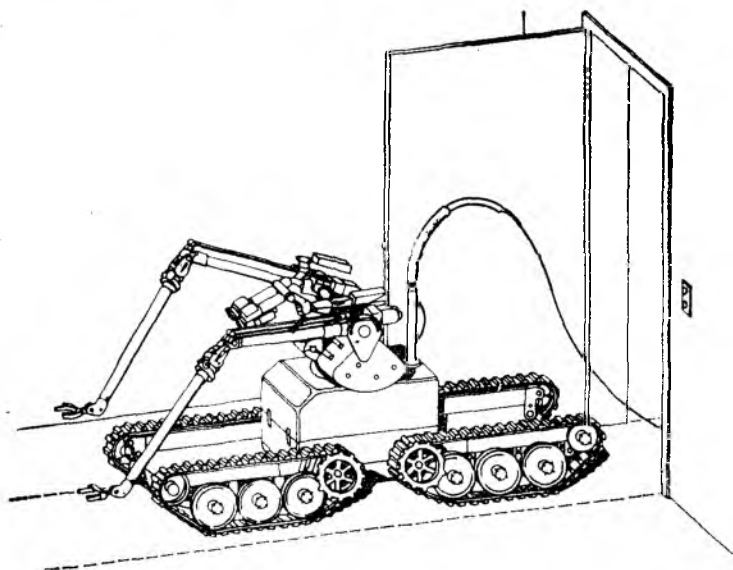


Рис. 3.14. Подвижный тяжелый робот на гусеничном ходу

над которой передвигается робот с помощью датчиков, контролирующих его положение относительно ленты. Робот имеет электромеханический манипулятор для установки и снятия контейнеров [35].

На рис. 3.13 показан вариант транспортного промышленного робота подвесного типа ТРТ-1—250, который передвигается по монорельсовому пути. Робот имеет два манипулятора грузоподъемностью 250 кг, захватные устройства которых закрыты снизу защитной сеткой, предохраняющей от самопроизвольного выпадения переносимого груза. Позиционирование робота на трассе осуществляется с помощью индукционных датчиков [32].

На рис. 3.14 представлен подвижный робот на гусеничном ходу. В гл. 11 рассмотрены шагающие транспортные устройства и различные типы специальных подвижных роботов — подводных, космических и других, в которых использованы соответствующие традиционные средства передвижения.

3.6. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

Устройство управления робота осуществляет автоматическое управление его манипуляционными устройствами и устройством передвижения, образуя в совокупности с ними как объектами управления систему автоматического управления робота. Кроме того, часто устройство управления роботом используют для управления различными другими объектами (технологическим оборудованием, транспортными устройствами и т. п.), которые работают совместно с роботом, образуя с ним единый технологический комплекс.

Как уже было сказано, по способу управления различают следующие системы управления роботом и соответствующие устройства управления:

программные, в которых управление осуществляется по заранее составленной и остающейся неизменной в процессе реализации управляющей программе;

адаптивные, в которых управление реализуется в функции от информации о текущем состоянии и изменениях внешней среды и самого робота, получаемой в процессе управления от сенсорных устройств;

интеллектуальные, в которых адаптивные свойства развиты до уровня, соответствующего интеллектуальной деятельности человека.

При этом в зависимости от типа реализуемого по отдельным степеням подвижности движения различаются устройства:

контурного управления, когда управляемое движение осуществляется по непрерывной траектории;

позиционного управления, когда управляемое движение производится шагами (по конечному числу точек позиционирования);

цикловое управление, когда число таких точек по каждой степени подвижности сводится к начальной и конечной, которая при этом определяется механическим упором или концевым выключателем.

Устройства управления могут быть индивидуальными, входящими в состав одного робота, или групповыми, управляющими несколь-

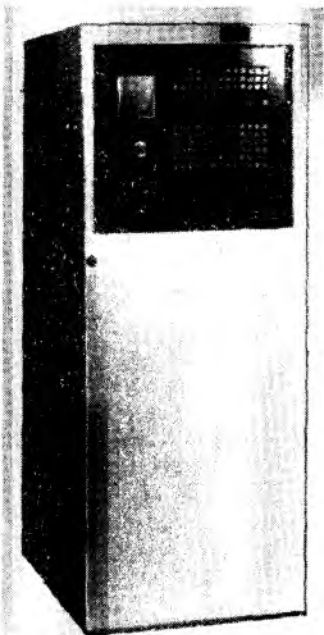


Рис. 3.15. Устройство контурного программного управления УКМ-772 промышленных роботов

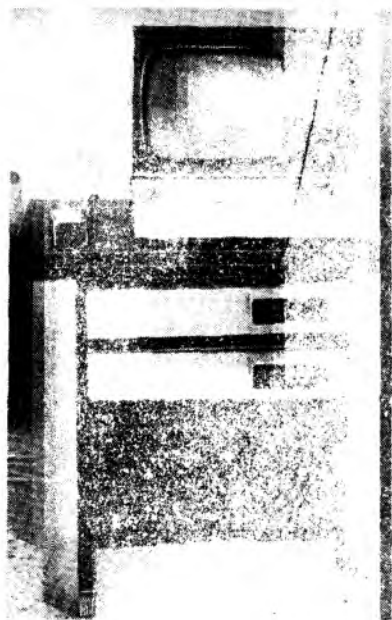


Рис. 3.16. Устройство адаптивного управления промышленного робота МП-8 с техническим зрением

кими роботами. Конструктивно индивидуальные устройства управления выполняют либо отдельно от механической части робота (см., например, рис. 1.5), либо, что значительно реже, в общем корпусе (см. рис. 3.5).

Большинство роботов имеет электронные устройства управления, выполненные на микроэлектронной элементной базе с применением микропроцессоров и микро- и мини-ЭВМ. На рис. 3.15 и 3.16 в качестве примера показаны такие электронные устройства управления для промышленных роботов, выполненные в виде отдельной конструкции.

Однако существуют и неэлектрические устройства управления роботов, чаще всего реализуемые по принципам пневмоники и предназначенные, как правило, для применения в особых взрыво- и пожароопасных условиях.

Управлению роботами посвящена гл. 5.

3.7. СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РОБОТОВ

Под сенсорными устройствами робота будем понимать чувствительные устройства, предназначенные для получения оперативной информации о состоянии внешней среды в адаптивных системах управления роботами. В отдельных системах робота имеются

также различные чувствительные устройства, необходимые для функционирования этих систем, например датчики обратной связи в приводах, во вторичных источниках питания и т. п. Однако эти чувствительные устройства, ориентированные на внутренние параметры отдельных составных частей робота, не специфичны для него в целом и поэтому не отнесены нами к сенсорным устройствам роботов как таковым.

По виду выявляемых свойств внешней среды сенсорные устройства роботов делятся на три группы:

- 1) сенсорные устройства, служащие для определения геометрических свойств объектов;
- 2) сенсорные устройства, выявляющие другие физические свойства объектов;
- 3) сенсорные устройства, выявляющие химические свойства объектов.

Характерными представителями сенсорных устройств первой группы являются измерители координат (информационные линейки, сканирующие локаторы, координаторы и т. п.). Вторая группа сенсорных устройств, предназначенных для определения физических свойств объектов, наиболее велика и разнообразна. Здесь в первую очередь следует выделить измерители усилий, плотности, упругости, температуры, цвета, оптической прозрачности. В третью группу входят измерительные устройства для установления химического состава и химических свойств среды.

Информация от сенсорных устройств используется в системе управления робота для обнаружения и распознавания объектов внешней среды, а также для управления движением робота и его манипуляторов. В соответствии с этим сенсорные устройства можно разделить по назначению на три группы: устройства, предназначенные для определения свойств среды, выявления объектов в рабочей зоне, и датчики обеспечения перемещений исполнительных органов робота.

К первой и второй группам относят чувствительные устройства, предназначенные для выявления различных физико-химических свойств объектов среды, включая, в частности, датчики параметров рельефа в рабочей зоне, специальных признаков для обнаружения и распознавания определенных объектов.

В третью группу входят всевозможные датчики положения и ориентации объектов в рабочей зоне относительно робота, датчики усилий, возникающих при взаимодействии робота с внешней средой, датчики прикосновения, проскальзывания и т. д.

Принятое разделение сенсорных устройств по функциональному назначению на три группы в какой-то мере условно. Так, например, сенсорные устройства первой группы могут быть использованы и для определения положения робота в рабочей зоне или схвата относительно робота, т. е. они способны выполнять функции датчиков обратной связи при управлении движением. Однако основным назначением датчиков третьей группы является все же информационное обеспечение систем, реализующих перемещение робота и мани-

пуляторов, а первой и второй групп — выявление свойств среды и объектов.

Сенсорные устройства робота могут воспринимать информацию на различных расстояниях от ее источника. По этому признаку сенсорные устройства делятся на сверхближние, ближние, дальние и сверхдальние.

Сенсорные устройства *сверхближнего* (контактного) действия используют для очувствления рабочих органов и других частей манипуляторов, а также корпуса робота. Они позволяют фиксировать их контакт с объектами внешней среды (тактильные датчики), измерять усилия, возникающие в месте взаимодействия (силометрические датчики), определять проскальзывание объектов при их удержании захватным устройством. Контактным сенсорным устройствам свойственна простота технической реализации, но они накладывают существенные ограничения на динамику и прежде всего на быстродействие управления роботом на всех уровнях.

Сенсорные устройства *ближнего действия* обеспечивают получение информации от объектов, расположенных непосредственно вблизи от рабочего органа манипулятора, т. е. на расстояниях, соизмеримых с его размерами, и от корпуса робота. К таким устройствам относятся, например, локационные сенсоры, различные дальномеры ближнего действия, измерители плотности грунта и т. п. Бесконтактные измерительные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задание с большей скоростью, заранее получать информацию об объектах до контакта с ними и соответствующим образом корректировать свои действия.

Сенсорные устройства *дальнего действия* служат для получения информации о внешней среде в объеме всей рабочей зоны робота.

Сенсорные устройства *сверхдальнего действия* дают информацию об объектах, находящихся вне рабочей зоны; их применяют главным образом в подвижных роботах. К таким устройствам относятся различные навигационные приборы, координаторы, локаторы и другие оптические системы соответствующей дальности действия и системы технического зрения. Эти устройства находят применение и в стационарных роботах при работе с подвижными объектами, чтобы заранее предусмотреть их появление в рабочей зоне.

В бесконтактных сенсорных устройствах для получения требуемой информации могут быть использованы излучаемые ими специальные сигналы (оптические, радиотехнические, радиационные и т. д.) или естественные излучения среды и отдельных объектов. В зависимости от этого различают активные и пассивные сенсорные устройства. Активные сенсорные устройства обязательно включают передающее устройство, излучающее первичный сигнал, и приемное устройство, регистрирующее прошедший через среду прямой сигнал или вторичный сигнал, отраженный от объектов среды. Пассивные устройства имеют, естественно, только приемное устройство, а роль излучателя играют сами объекты внешней среды. В связи с этим пассивные сенсорные устройства технически обычно проще и дешевле активных, но менее универсальны.

Помимо этого сенсорные устройства можно разделить на устройства с фиксированным направлением восприятия и с переменным направлением восприятия (сканирующие).

По типу сигналов, используемых в сенсорных устройствах, они делятся на устройства непрерывного и дискретного действия.

В настоящее время для очувствления роботов наиболее широко применяют тактильные, локационные и силометрические сенсорные устройства, а также системы технического зрения.

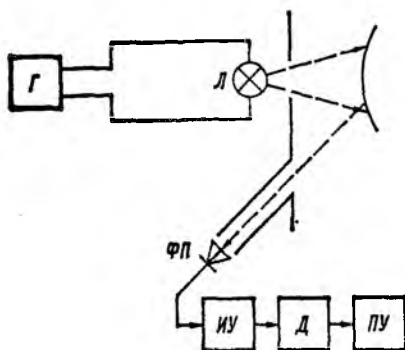


Рис. 3.17. Схема светолокационного сенсорного устройства

Тактильные сенсоры относят к простейшим чувствительным устройствам. Они служат для сигнализации о соприкосновении рабочего органа манипулятора или корпуса робота с объектами внешней среды, а также используются при решении некоторых задач распознавания и определения размеров объектов. Эти устройства могут быть технически реализованы на контактных выключателях, герметизированных магнитоуправляемых контактах, пьезокристаллических преобразователях, на основе токопроводящей резины и т. д. Важным требованием, предъявляемым к этим датчикам, является высокая чувствительность (срабатывание при усилии в единицы и десятки грамм) при малых габаритах, сочетающаяся с высокой механической прочностью и надежностью.

Существенный недостаток тактильных сенсоров, как уже упоминалось, заключается в том, что они, как правило, накладывают ограничения на быстрдействие робота. Для повышения надежности и скорости выполнения рабочих операций захватные устройства робота часто очувствляют бесконтактным рецепторным полем. Эта задача может быть решена, в частности, с помощью светолокационных и ультразвуковых датчиков.

На рис. 3.17 приведена функциональная схема светолокационного датчика. Световой поток, создаваемый лампой накаливания Л, модулируется изменением напряжения питания, поступающего с генератора Г, проходит через диафрагму и излучается в пространство. При появлении в поле этого излучения какого-либо препятствия происходит отражение светового потока. Часть отраженного светового потока попадает на фотоприемник ФП, усиливается избирательным усилителем ИУ, настроенным на частоту модуляции излучения, и после детектирования детектором Д подается на пороговое устройство ПУ. Последнее выдает сигнал при превышении принятым сигналом заданного уровня. Датчик имеет дальность действия 3—7 см, время срабатывания 30 мс, максимальную погрешность до 30 %.

На рис. 3.18 представлена схема ультразвукового сенсорного устройства. Его принцип действия заключается в акустической

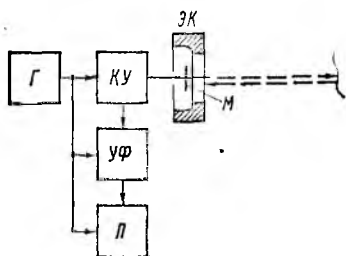


Рис. 3.18. Схема ультразвукового сенсорного устройства

локации пространства вблизи схвата. Генератор Γ вырабатывает одиночные короткие электронные импульсы высокого напряжения. Эти импульсы через коммутирующее устройство $KУ$ поступают на электрод электростатического капсюля $ЭК$. Под действием электростатического поля мембрана $М$ капсюля деформируется, излучая в воздух ультразвуковой импульс, который после отражения от объекта воспринимается тем же капсюлем. Усиленный и сформированный импульс (усилителем-формирователем $УФ$) поступает далее на преобразователь $П$, формирующий импульс, длительность которого пропорциональна расстоянию до отражающей поверхности. Устройство имеет дальность действия 0,01—0,07 м, время срабатывания не более 10 мс, погрешность до 2 %.

Для определения пространственных координат объектов, находящихся в рабочей зоне робота, служат координаторы, информационные линейки и поля, чувствительные поверхности. Для этой же цели пригодны и системы технического зрения.

В частности, для определения угловых координат объектов можно использовать телевизионную систему с одной передающей камерой. Дальность до объекта в этом случае определяется методом автоматической оптической фокусировки (АОФ). Погрешность измерения такой системой угловых координат составляет несколько процентов, а погрешность определения дальности — около 10 %. (Подобные системы измерения координат применяют для целеуказания в системах супервизорного управления интегрального робота ЛПИ-2 и подводного робота-геолога, упомянутых в параграфе 1.3.)

Однако основным назначением систем технического зрения в роботах является получение видеoinформации об объектах внешней среды с целью их обнаружения, распознавания и идентификации. Как было показано в параграфах 1.2 и 1.3, создание систем технического зрения и использующих их очувствленных промышленных роботов относится к одной из наиболее актуальных задач современной робототехники. При этом наряду с изучением и использованием методов решения этой задачи, присущих живой природе, широким фронтом ведутся разработки технических решений, не имеющих аналогов в природе. По сравнению со зрением живых организмов задача обеспечения технического зрения проще в том отношении, что, как правило, здесь существенно более ограничен и заранее предопределен перечень объектов внешней среды, с которыми предстоит иметь дело, и существует возможность в определенной степени специально организовать внешнюю среду для облегчения работы видеосистем.

Например, часто для распознавания объектов можно маркировать их, применять контрастирующие с объектами поверхности, на которых они расположены, специальные системы освещения и т. д.

Например, часто для распознавания объектов можно маркировать их, применять контрастирующие с объектами поверхности, на которых они расположены, специальные системы освещения и т. д.

Вместе с тем по сравнению с видеосистемами других назначений к системам, предназначенным для использования в составе роботов, предъявляются такие серьезные требования, как необходимость работать в реальном масштабе времени, т. е. с выдачей результатов через сотые доли секунды после изменения внешней среды в поле зрения системы, обеспечивать практически 100 %-ную правильность решений, обладать высокой надежностью при невысокой стоимости.

Системы технического зрения могут быть монокулярными, бинокулярными (стереозрение) и с большим числом «точек зрения». Специфическим в этом отношении для роботов вариантом является применение подвижных видеосенсорных устройств, в том числе размещаемых на манипуляторах.

Системы технического зрения делятся также на цветные и черно-белые. Простейший вариант черно-белых систем, получивший на сегодня наибольшее распространение, — это двухуровневые системы, в которых выделяются только две крайние градации яркости изображения (0 или 1) без учета промежуточных значений яркости (полутонов серого цвета).

Система технического зрения (рис. 3.19) состоит из первичного преобразователя зрительного изображения в электрический сигнал, устройства предварительной обработки зрительной информации и ЭВМ, которая реализует конкретные алгоритмы анализа внешней среды, распознавания ее зрительных образов, выявления конкретных свойств внешней среды и определения требуемых количественных параметров ее.

В качестве первичных преобразователей применяют электронно-лучевые преобразователи, т. е. телевизионные передающие трубки, и полупроводниковые приборы, особенно с зарядной связью (ПЗС-структуры) [20]. Наряду с видимым диапазоном электромагнитного излучения преобразователи работают и в других участках спектра этого излучения: в инфракрасном (ИК) диапазоне (тепловидение), ультракоротком (субмиллиметровом) радиодиапазоне, рентгеновском диапазоне.

Применяют также ультразвуковые преобразователи. Отдельную их группу образуют преобразователи, способные работать в непрозрачных средах вплоть до твердых тел (интроскопия). В последнем случае используются различные проникающие излучения, в частности рентгеновское и ультразвуковое.

Чувствительная часть первичного преобразователя может представлять собой двумерную поверхность, на которую проецируется внешняя среда. Эта поверхность может быть выполнена и в виде одномерной «линейки», которая перемещается относительно внеш-

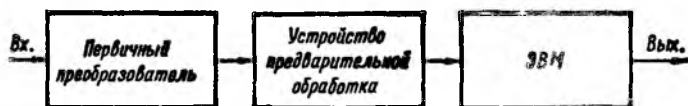


Рис. 3.19. Структурная схема системы технического зрения

ней среды в направлении, перпендикулярном к ее линейному размеру, либо за счет собственного движения (сканирования), либо в результате движения самой внешней среды (например, детали на конвейере). Наконец, в простейшем случае это может быть точечный чувствительный элемент, сканирующий по плоскости (например, в прямоугольной системе координат в виде строчной развертки). В первом случае вся зрительная информация поступает на выход параллельно, а во втором и третьем случаях — несколькими последовательными пакетами.

Зрительная информация обрабатывается иерархически на нескольких уровнях аналогично тому, как это происходит в живых организмах (см. приложение 2). С позиций аппаратной реализации эти уровни образуют два этапа обработки информации, как и показано на рис. 3.19. Первый этап — обработка исходной зрительной информации в специальном устройстве предварительной обработки. Дело в том, что в связи с большим объемом информации, содержащимся в видеоизображении, до ее передачи в ЭВМ следует отфильтровывать большую ее часть и сжать, выделив только информацию, минимально необходимую для реализации конкретных алгоритмов использования зрительной информации в процессе функционирования данного робота. Для такой предварительной обработки требуются методы, отличные от применяемых в современных ЭВМ, и, в частности, с использованием пространственно-временной фильтрации, подобной реализуемой в нейронных сетях живых организмов (см. приложение 2). Этот путь связан с созданием полупроводниковых многослойных матричных однородных структур, прообразом которых является перцептрон, и аналоговых оптических систем параллельной обработки информации, в том числе с использованием голографических методов [20].

Обработку информации после ее сжатия можно осуществлять уже последовательно в цифровой форме на стандартных ЭВМ (рис. 3.19). На этом этапе информация обрабатывается тоже иерархически путем последовательного выделения все более общих признаков объектов внешней среды вплоть до формирования модели среды той степени абстракции, которая необходима для решения на ее основе конкретных задач, поставленных перед роботом. При этом, как упоминалось выше, для максимального упрощения алгоритмов обработки информации используется вся априорная информация о модели внешней среды и ограничениях на ее изменение.

Так, подобно происходящему в живых организмах, обычно последовательно осуществляются выделение контуров объектов внешней среды, затем отделение этих объектов друг от друга, определение их свойств, которые существенны для распознавания и классификации. Одним из наиболее распространенных в силу своей простоты способов распознавания и идентификации объектов является использование эталонных моделей (шаблонов), с которыми сравнивают объекты внешней среды. В самом простейшем случае такое сравнение производится непосредственно на уровне зрительного образа оптическими средствами. Так, например, можно контролировать качество

печатных плат и микросхем. Однако чаще всего такой эталон задается аналитически в численной (двоичной) форме, к которой приводятся и сравниваемые с ним объекты. При этом эталон может либо рассчитываться человеком-оператором и затем вводиться в память ЭВМ системы технического зрения, либо вырабатываться самой системой в порядке ее обучения путем показа ей достаточного количества конкретных образцов данного типа объектов.

В качестве примера рассмотрим систему технического зрения промышленного робота МП-8, который был упомянут в параграфе 1.3 как один из первых отечественных роботов с таким чувствлением. Система технического зрения этого робота является частью его системы управления и конструктивно выполнена в виде отдельного модуля технического зрения (МТЗ). Типовое назначение МТЗ — обслуживание сборочных и других операций, в процессе которых необходимо производить захватывание неориентированных предметов и их идентификацию, осуществлять контроль качества и автоматическую сортировку продукции.

Структурная схема МТЗ приведена на рис. 3.20. В состав МТЗ входят видеодатчик, в качестве которого использована телевизионная камера «Взор» с электростатической отклоняющей системой, видеопроцессор и микро-ЭВМ «Электроника-60М». Видеопроцессор выполняет преобразование, предварительную обработку, фильтрацию и сжатие информации, поступающей от видеодатчика. Управляемый усилитель видеосигнала и оперативное запоминающее устройство кадра обеспечивают компенсацию влияния неравномерной

освещенности рабочей зоны, бликов и других мешающих нормальной работе МТЗ факторов.

Для повышения достоверности предварительной обработки

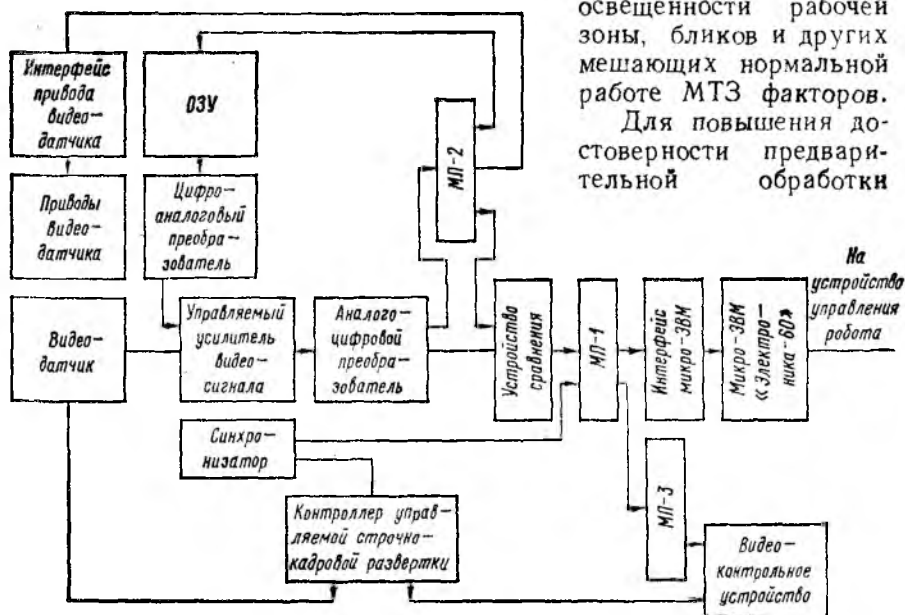


Рис. 3.20. Структурная схема МТЗ промышленного робота МП-8

информации и борьбы с оптическими и электрическими помехами в микропроцессоре МП-1 осуществляется мажоритарная обработка строчной информации телевизионного кадра. Микропроцессор МП-2 обеспечивает представление в цифровой форме и запись в оперативное запоминающее устройство ОЗУ видеосигнала оптического фона. Этот же микропроцессор управляет приводами ориентации видеодатчика.

Для удобства работы человека-оператора на видеоконтрольное устройство могут быть выведены исходное изображение рабочей сцены, изображение, полученное в результате предварительной обработки в видеопроцессоре, и модель принятого изображения, сформированная в микро-ЭВМ. Этими операциями управляет микропроцессор МП-3.

Общая схема работы МТЗ такова. Перед началом работы производится обучение МТЗ, если оно не было выполнено ранее. В процессе обучения каждый из объектов, с которыми предстоит работать МТЗ, помещается в рабочее поле примерно в 20 различных положениях. В результате МТЗ формирует каталог «эталонов» рабочих объектов, т. е. тех объектов, которые он в состоянии идентифицировать.

После этого с помощью реперного объекта производится согласование систем координат, связанных с видеодатчиком и манипулятором, для чего манипулятор помещает реперный объект в две заранее определенные точки рабочего поля, а МТЗ определяет его положение.

При появлении объектов в рабочем поле МТЗ выдает в видеодатчик информацию о них, разделяя при этом ее на части по принадлежности к каждому компактному образу. В результате обработки информации, относящейся к каждому образу, формируется точка в пространстве признаков, по которым осуществляется его идентификация. Параллельно вычисляются геометрические параметры, определяющие положение и ориентацию объекта, что необходимо для его захватывания и перемещения манипулятором. Как только получают данные о положении центра площади объекта, МТЗ вычисляет управляющие воздействия на манипулятор и выдает их в систему его управления. Последняя выводит схват манипулятора в положение над выбранным объектом, а ЭВМ в это время рассчитывает ориентацию объекта. После этого схват ориентируется нужным образом и осуществляется захват объекта. Например, при использовании двухпальцевого схвата удлиненные предметы необходимо брать так, чтобы пальцы схвата были перпендикулярны к главной центральной оси инерции объекта, которой соответствует минимальный момент инерции.

После захватывания объекта МТЗ выдает на манипулятор команду о перемещении объекта и одновременно завершает его идентификацию с тем, чтобы к моменту приближения объекта в заданную область рабочей зоны, например в зону сборки, можно было уже располагать всеми данными, необходимыми для дальнейшей работы с ним.

В МТЗ еще на этапе ввода видеoinформации в ЭВМ предусматривается значительное сокращение объема используемой информации. Это делается с целью уменьшить как требуемый объем памяти, так и время обработки. В качестве основной характеристики плоского изображения используется его контур.

На этапе ввода и предварительной обработки видеoinформации производятся определение и ввод в ЭВМ координат контурных точек изображения, которые могут быть получены при помощи горизонтальной развертки телевизионной камеры. Точки, лежащие на горизонтальных участках контура, вычисляются программными средствами. Предварительная обработка и ввод информации в МТЗ осуществляются специализированным устройством — видеопроцессором.

Характеристикой положения объекта в рабочем поле, применяемой также в качестве параметра при вычислении признаков формы для идентификации объекта, служат координаты центра площади изображения.

При определении центра объект рассматривают как тело, составленное из полос единичной ширины. Одновременно с вычислением координат центра площади определяют площадь объекта.

Координаты центра площади двумерного изображения объекта в системе координат, связанной с телекамерой, рассчитывают по следующим формулам:

$$x_c = \sum_{i=1}^N i \sum_{j=1,2}^{L(i)} [y(i, j+1) - y(i, j)]/S;$$

$$y_c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1,2}^{L(i)} [y(i, j+1) - y(i, j)] [y(i, j+1) + y(i, j)]/S,$$

где N — число строк в кадре; i — номер текущей строки в кадре; $L(i)$ — количество контурных точек в i -й строке; j — номер контурной точки в строке; $y(i, j)$ — декартова координата j -й контурной точки из i -й строки в системе координат, связанной с телекамерой; S — площадь объекта

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1,2}^{L(i)} [y(i, j+1) - y(i, j)].$$

Для вычисления признаков формы объекта необходимо восстановить его полный контур, включая точки, лежащие на горизонтальных границах. Алгоритм восстановления контура основан на последовательном сравнении информации о соседних строках кадра. При этом одновременно вычисляют площадь и периметр контура.

Остальные признаки формы объекта рассчитывают в результате обработки массива координат контурных точек полного контура. К этим признакам относят:

S_R — среднее арифметическое расстояний R_i от контурных точек до центра площади, где $R_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$,

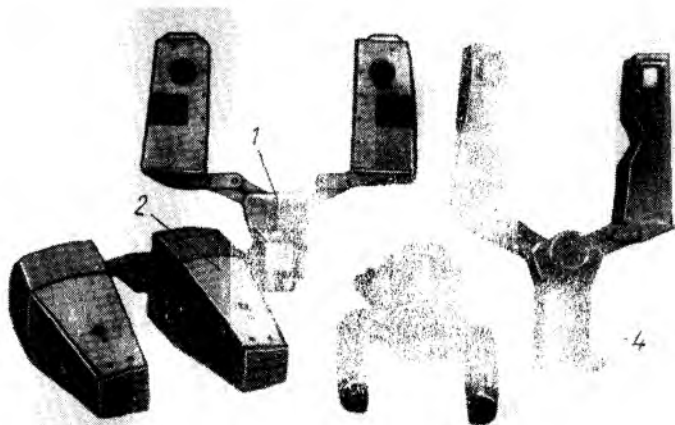


Рис. 3.21. Очувствленные схваты ЦНИИ РТК:

1 — СЗУ-1 с девятью ультразвуковыми датчиками; 2 — ССЛТ-1 с девятью тактильными и восемью световыми локаторами; 3 — ССЛТ-2 с 26 тактильными датчиками и 16 световыми локаторами; 4 — СУЗ-2 с 12 ультразвуковыми локаторами

$i = 1, 2, \dots, m$; m — число точек в полном контуре; x_i, y_i — декартовы координаты i -й контурной точки в системе координат, связанной с телекамерой;

S_{DR} — среднее арифметическое квадратов разностей R_i и S_R ;

$R_{\max}, R_{\min}$ — максимальное и минимальное значение R_i ;

$F_{\max}, F_{\min}$ — максимальный и минимальный моменты инерции относительно главных центральных осей контура, рассматриваемого как совокупность материальных точек единичной массы.

Выбор этих признаков формы определяется тем, что они мало зависят от ориентации объекта и их достаточно быстро вычисляют по следующим формулам:

$$S_R = \sum_{i=1}^m R_i;$$

$$S_{DR} = \sum_{i=1}^m (R_i - S_R)^2/m;$$

$$R_{\max} = \max_{i=1, m} \{R_i\};$$

$$R_{\min} = \min_{i=1, m} \{R_i\};$$

$$F_{\max} = (S_{xx} - 2KS_{xy} + K^2S_{yy})/(K^2 + 1);$$

$$F_{\min} = (K^2S_{xx} + 2KS_{xy} + S_{yy})/(K^2 + 1),$$

где $S_{xx} = \sum_{i=1}^m (x_i - x_c)^2$;

$$K = (S_{xx} - S_{yy} - \sqrt{(S_{xx} - S_{yy})^2 + 4S_{xy}^2}) / 2S_{xy};$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^m (x_i - x_c)(y_i - y_c);$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^m (y_i - y_c)^2.$$

Кроме признаков формы вычисляют положение главной центральной оси контура в виде угла наклона ее относительно оси X , который равен $\arctg(-K)$.

Получаемый таким образом восьмикомпонентный вектор признаков служит на этапе обучения для формирования «эталона» объекта. В качестве такого «эталона» берется среднее арифметическое значение вектора признаков, полученных в процессе обучения распознаванию данного объекта.

На этапе идентификации объекта, находящегося в рабочем поле МТЗ, вычисленный вектор признаков сравнивается со всеми эталонами из каталога рабочих объектов. Объект идентифицируется с тем «эталоном», расстояние до которого в пространстве признаков минимально.

Программное обеспечение МТЗ построено по модульному принципу, требуемый объем памяти около 10 Кбайт [32].

Конструктивно сенсорные устройства размещают на рабочих органах манипуляторов (устройства сверхближнего и ближнего действия), на корпусе робота или вне робота (устройства дальнего и сверхдальнего действия). На рис. 3.21 показаны некоторые оучувствленные схваты роботов, разработанные в ЦНИИ РТК.

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИВОДОВ

Привод, как известно, включает прежде всего двигатель и устройство управления им. Кроме того, в состав привода 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 их встраивания в подвижные части робота — в манипуляторы и устройства передвижения — габариты и масса приводов должны быть минимальными. Приводы в роботах работают в основном в неустойчивом режиме и с резко переменной нагрузкой. При этом переходные процессы в них должны быть практически неколебательными. Важными параметрами приводов роботов являются также надежность, стоимость, удобство эксплуатации. Требования, предъявляемые к их способу управления, быстрдействию и точности, непосредственно определяются соответствующими требованиями к роботу в целом, рассмотренными в параграфе 3.1 при классификации роботов. В частности, обычно требуется, чтобы скорость поступательного движения приводов роботов на выходе составляла 0,5—1,5 м/с при погрешности обработки перемещения в долях миллиметра.

В роботах нашли применение практически все известные типы приводов: электрические, гидравлические и пневматические; с поступательным и вращательным движением; регулируемые (по положению, скорости и т. д.) и нерегулируемые; замкнутые (с обратной связью) и разомкнутые; непрерывного и дискретного действия (в том числе шаговые). Около 40 % роботов в мире выполнены на пневматических приводах, примерно столько же — на гидравлических, а остальные 20 % — на электрических, причем доля последних неуклонно растет (см. параграф 1.2).

Широкое распространение пневматических приводов в робототехнике объясняется их простотой, дешевизной и надежностью. Правда, эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном как нерегулируемые с цикловым управлением. Кроме того, пневматические приводы применяют только для роботов небольшой грузоподъемности — до 10, реже 20 кг.

Однако в связи с тем, что развитие робототехники, естественно, началось с освоения наиболее простых и легких роботов, пневматические приводы сразу же получили в них широкое распространение, а так как в промышленности, где используется основная часть

парка роботов, такие простые и дешевые роботы оказались очень эффективны и требуются все в большем количестве, доля пневматических роботов в общей парке роботов продолжает сохраняться на указанном выше уровне, несмотря на появление и быстрое развитие более совершенных роботов других типов.

Гидравлические приводы наиболее сложны и дорогостоящи по сравнению с пневматическими и электрическими. Однако при мощности 500—1000 Вт и выше они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками и поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов. Гидравлические приводы хорошо управляются как в позиционном, так и в контурном режиме. Благодаря последнему обстоятельству гидравлический привод нашел применение и в роботах средней грузоподъемности, когда требуются высокие динамические характеристики.

Сравнительно скромные позиции, которые занимает на сегодня в робототехнике электрический привод, несмотря на его хорошую управляемость, простоту подвода энергии, значительно больший КПД и удобство эксплуатации, объясняются тем, что он имеет худшие массогабаритные характеристики, чем пневматический и гидравлический приводы. Увеличение в последние годы доли электромеханических роботов в общей парке роботов в мире продиктовано именно быстрым прогрессом в развитии новых типов электрических двигателей, специально предназначенных для роботов и позволяющих создавать для них все более компактные комплекты приводов всех требуемых типов. Основная область применения электрических приводов в робототехнике на сегодняшний день — это роботы средней грузоподъемности (десятки килограмм), легкие роботы с позиционным и контурным управлением и тяжелые, прежде всего подвижные роботы, с цикловым и простым позиционным управлением, когда они оказываются выгоднее гидравлических.

Для иллюстрации сказанного на рис. 4.1 и 4.2 приведены обобщенные сравнительные характеристики различных типов приводов

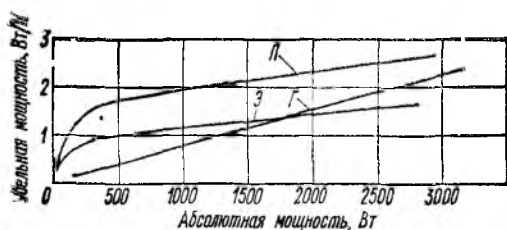


Рис. 4.1. Удельная мощность электрических Э, гидравлических Г и пневматических П приводов в зависимости от их абсолютной мощности

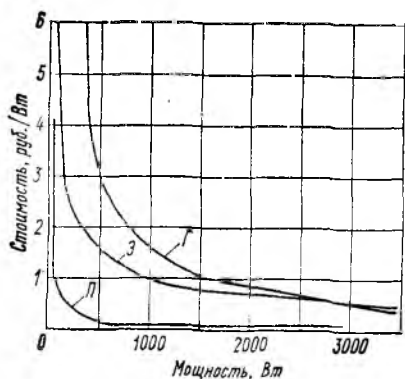


Рис. 4.2. Стоимость электрических Э, гидравлических Г и пневматических П приводов в зависимости от их мощности

роботов по удельной мощности и стоимости. 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.

4.2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ

В пневмопривод одной степени подвижности 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 резиновым уплотнением, которое имеет малое трение по фторопласту, и штока. В пневмоцилиндры обычно встроен также 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 с атмосферой для выпуска воздуха, сжимаемого движущимся поршнем. Направление движения поршня со штоком зависит от того, с какой стороны от поршня подается сжатый воздух.

Поворотные пневматические двигатели, применяемые в роботах, 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 получаются полости для воздуха, разделенные подвижной лопастью.

Существуют также поворотные пневматические двигатели, состоящие из пневмоцилиндров и механической передачи типа рейка—шестерня, которая преобразует поступательное движение рейки в поворот шестерни. Пневматические двигатели работают на сжатом воздухе давлением 0,3—0,6 МПа.

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

Сжатый воздух поступает на приводы робота от общего блока питания, который состоит из аппаратуры подготовки воздуха и редуктора. Подготовка воздуха заключается в его очистке от влаги и механических примесей и внесении распыленного масла для смазки трущихся поверхностей в приводе. Редуктор обеспечивает поддержание определенного давления воздуха на входе привода.

Сжатый воздух на вход блока питания поступает из общей пневмосети, в которую он подается от компрессора (компрессорной станции).

Как было указано, в настоящее время подавляющее большинство пневмоприводов роботов имеют цикловое управление, которое еще называют управлением позиционным по упорам. При таком управлении 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, с помощью которого осуществляются гашение энергии движения и безударное торможение привода. Одновременно с этим прекращается подача воздуха в двигатель. Демпферы применяют в основном гидравлические, а для маломощных приводов — более простые пружинные. Прибегают также к способу торможения противодавлением, при котором демпфера 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).

Программирование 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 (погрешность 0,1 мм и менее), повышенное быстродействие (скорость перемещения до нескольких метров в секунду).

Разработаны конструкции пневмоприводов 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 в плоскости, перпендикулярной к оси барабана, как бы по винтовой траектории. 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 строго синхронизировано с движением штока двигателя.

Существуют также конструкции подобных приводов с выдвижными упорами, снабженными индивидуальными приводами. Позиционирование пневмоприводов в промежуточных точках может осуществляться помимо выдвижных упоров с помощью обычного позиционного управления двигателем с применением обратной связи по положению. Однако точность при этом существенно ниже, чем в точках, фиксируемых упорами.

Минимальная дискретность точек позиционирования пневмоприводов и, соответственно, наибольшее число таких точек на заданном пути ограничены конечным путем торможения, который при скорости около 1 м/с может достигать 100 мм.

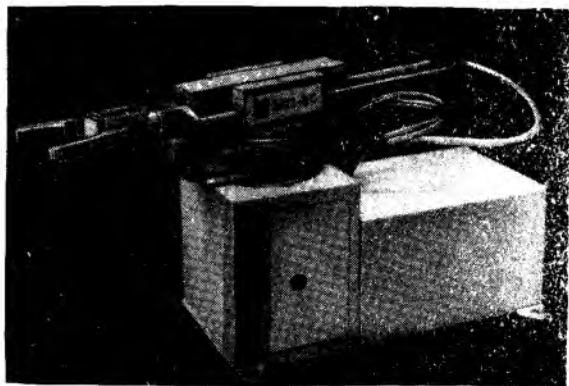


Рис. 4.3. Пневматический промышленный робот МП-9С

Для повышения точности позиционирования в промежуточных точках пневмоприводы снабжают тормозом (обычно электромагнитным).

Пока в мире созданы всего несколько марок пневматических промышленных роботов с позиционным управлением.

Другим вариантом 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, три таких привода дают в совокупности восемь точек позиционирования, четыре привода — 16 точек позиционирования и т. д.

Рассмотрим конструкции некоторых роботов, построенных на базе пневмоприводов. На рис. 4.3 показан самый массовый отечественный пневматический промышленный робот МП-9С. Робот получил наиболее широкое применение на сборочных операциях и для обслуживания прессов холодной штамповки. На рис. 4.4 представлена общая схема робота. Устройство циклового управления робота выполнено отдельным (см. параграф 5.1).

Робот оснащен двумя сменными двухпальцевыми схватами для взятия и удержания деталей за наружную и внутреннюю поверхности и вакуумным захватным устройством для взятия деталей за плоскую поверхность.

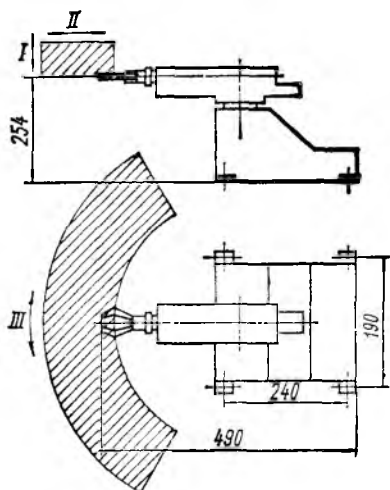


Рис. 4.4. Схема промышленного робота МП-9С

Техническая характеристика робота МП-9С (рис. 4.4)

Число степеней подвижности	3
Переносные степени подвижности *:	
подъем I, мм (скорость подъема, мм/с)	30 (300)
выдвижение II, мм (скорость выдвижения, мм/с)	150 (300)
поворот III, ° (скорость поворота, °/с)	120 (90)
Грузоподъемность, кг	0,2
Погрешность позиционирования, мм	0,05
Способ управления	Цикловой
Число команд	10
Число кадров в программе	18
Масса манипулятора, кг	25

* Здесь и в дальнейшем термины «подъем-опускание», «выдвижение-втягивание» для краткости заменены соответственно на «подъем» и «выдвижение».

Как видно из технической характеристики, манипулятор робота МП-9 имеет только переносные степени подвижности, обеспечивающие ему работу в цилиндрической системе координат.

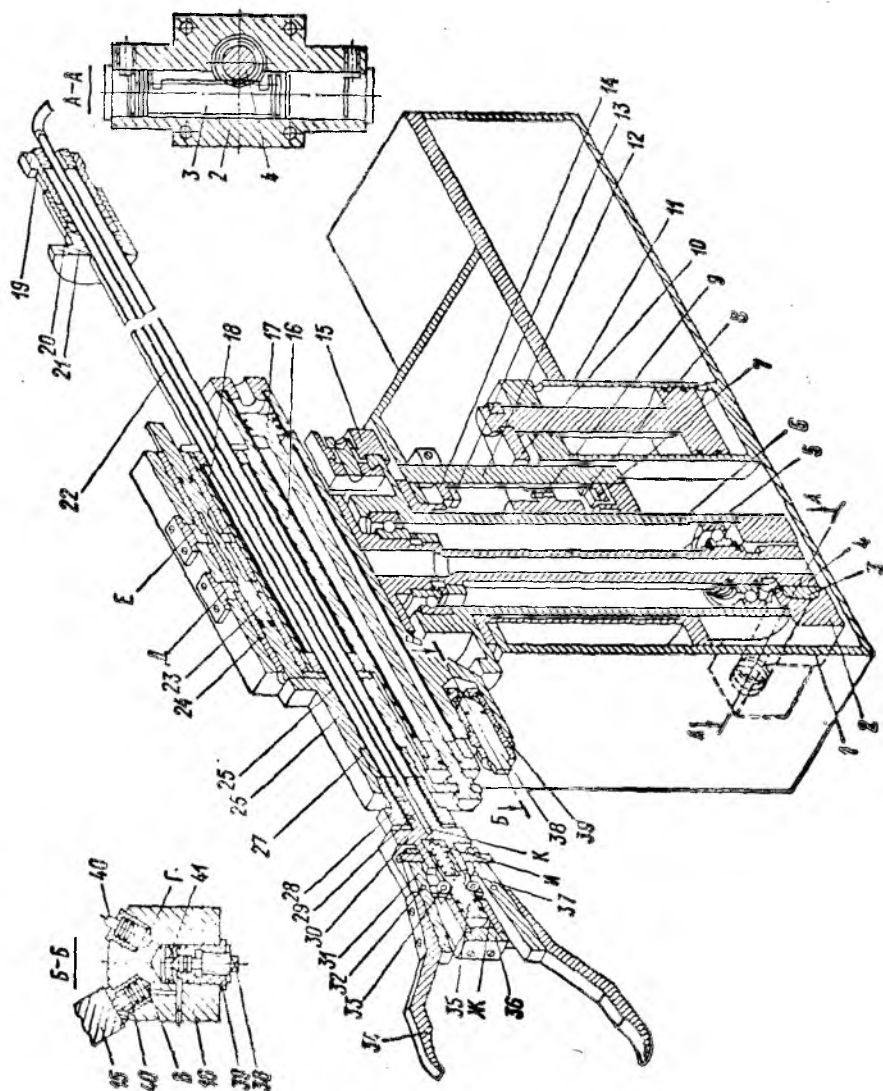
Рассмотрим особенности конструктивного исполнения манипулятора и его приводных механизмов (рис. 4.5). Механизм подъема манипулятора размещен в стальном сварном корпусе 1 и приводится в действие пневмоцилиндром 11, гильза которого жестко связана с корпусом 1, а шток через кронштейн 10 — с втулкой 6. При подаче сжатого воздуха в нижнюю или верхнюю полость пневмоцилиндра 11 втулка 6 поднимается или опускается вместе с валом 5 и установленным на нем механизмом выдвижения схвата. От поворота втулка 6 удерживается направляющей 12, входящей в паз кронштейна 10.

Ход и точки позиционирования втулки 6 определяются соответствующей фиксацией перемещающихся по направляющей 12 упоров 8 и 14. Так как ход вертикального перемещения манипулятора сравнительно мал (30 мм), демпфирования в концах хода для этого перемещения не производится. Для подачи в устройство управления сигнала о достижении конечных положений манипулятора в кронштейне 10 установлен постоянный магнит 9, а на упорах 8 и 14 — датчики 7 и 13 с магнитоуправляемыми герметичными контактами (КЭМ-2А), срабатывающими в тот момент, когда кронштейн 10 касается упоров 8 и 14.

Механизм поворота манипулятора выполнен в виде реечной пары и состоит из корпуса 2 сдвоенного пневмоцилиндра, поршня-рейки 3 и шестерни 4. Корпус 2 прикреплен к втулке 6, а шестерня 4 жестко связана с вертикальным валом 5, к верхнему фланцу которого прикреплен механизм выдвижения схвата.

Диапазон поворота манипулятора регулируется перемещением двух жестких упоров 15 по верхнему фланцу втулки 6. В отличие от механизма подъема механизм поворота выполнен с демпфированием в концах хода. Это достигается за счет сообщающихся через дроссельное отверстие 41 во втулке 39 полостей В и Г в корпусе 16, заполненных маслом и закрытых поршнями 40, штоки которых в конце поворота манипулятора контактируют с упорами 15. Из одной полости в другую масло перетекает через дроссельное отверстие 41 во

Рис. 4.5. Кинематическая схема промышленного робота МП-4С



штулке 39. Дросселирование (степень торможения) регулируется винтом 38.

Как и в механизме подъема манипулятора, для подачи сигнала в устройство управления в концах поворота манипулятора на упорах 15 установлены датчики с магнитоуправляемыми герметичными контактами, а в корпус 16 встроены постоянные магниты.

Механизм выдвижения схвата состоит из стального корпуса 16, в который встроен пневмоцилиндр выдвижения со штоком 17. Выдвижение схвата составляет 150 мм. Кроме того, на корпусе закреплены направляющая гильза 18 и гильза 24 демпфера. По направляющей гильзе 18 перемещается труба 25, на которой закреплен схват манипулятора. На трубе 25 имеются корпуса упоров 21 и 26, определяющих выдвижение схвата и фиксирующихся на трубе 25 сжатием колец 20, 27 и гайками 19 и 28. На корпусе упора 26 закреплен шток 17 пневмоцилиндра выдвижения.

Демпфирование в конце хода выдвижения и втягивания схвата осуществляется следующим образом. В гильзе 24 находится плунжер 23 с конической шейкой в средней части. В корпусе 16 выполнены полости Д и Е, заполненные маслом.

При нажатии упора 21 на правый конец плунжера 23 при выдвижении схвата плунжер 23 также перемещается. При этом объем полости Е уменьшится, а объем полости Д увеличится, вследствие чего масло начнет перетекать из полости Е в полость Д. Однако по мере перемещения плунжера 23 кольцевой зазор между конической частью плунжера и гильзой 24 демпфера постепенно уменьшается и масло дросселируется, поглощая кинетическую энергию выдвижения схвата. При втягивании схвата демпфер работает аналогично.

К упорам 21 и 26 прикреплены постоянные магниты, а к корпусу 16 — датчики с магнитоуправляемыми контактами, дающими сигналы в устройство управления в концах хода выдвижения или втягивания схвата.

Как указано выше, манипулятор робота МП-9С комплектуют двумя схватами. На кинематической схеме представлен вариант схвата для взятия и удержания деталей за наружную поверхность. Схват состоит из корпуса 30, прикрепляемого винтами 29 к трубе 25, и поршня 35 с выточкой в средней части, в которую заходят ролики 33 коромысел 31. К коромыслам 31 крепятся сменные пальцы 34. При подаче сжатого воздуха по трубке 22 по каналу К в полость Ж поршень движется вправо, увлекая за собой ролики 33. При этом коромысла 31 поворачиваются на осях 32 так, что пальцы 34 смыкаются и зажимают деталь. При сбросе давления воздуха в полости Ж раскрытие пальцев схвата происходит под действием возвратной пружины 37.

Если поршень 35 развернуть на 180° так, чтобы пружина 37 упиралась в крышку 36, и сменить пальцы 34, то, подавая воздух в полость И, можно захватывать полые детали за внутреннюю поверхность.

На рис. 4.6 изображено вакуумное захватное устройство робота для плоских деталей, состоящее из жиклера 3, корпуса 4 и держа-

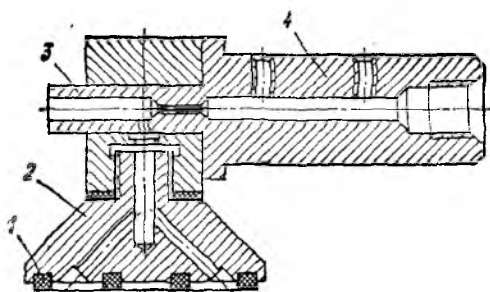


Рис. 4.6. Вакуумное захватное устройство промышленного робота МП-9С для плоских деталей

теля 2. При подаче сжатого воздуха в жиклер 3 вследствие эжекторного эффекта воздух отсасывается из-под держателя и деталь присасывается к резиновым кольцам 1.

Пневматическая схема робота МП-9С представлена на рис. 4.7. Воздух из магистральной через запорный муфтовый вентиль 1 (типа 15K418BP), влагоотделитель 2 (типа В41—13), регулятор давления 3 (типа БВ57—33) и маслораспылитель 5 (типа В44—23) поступает к электропневматическим нормально закрытым клапанам 7—13 (типа 4152550179—12). Давление в системе контролируется с помощью технического манометра 4 (типа МТ-3).

При включении клапана 7 воздух поступает в пневмоцилиндр 17 схвата. Пальцы схвата сближаются и зажимают деталь. При отключении клапана 7 воздух из пневмоцилиндра 17 стравливается в атмосферу и поршень под действием пружины возвращается в исходное положение.

При включении клапанов 8—13 воздух через клапаны 8, 10, 12 поступает соответственно к пневмоцилиндрам поворота манипулятора 16, подъема манипулятора 15, выдвижения захватного устройства 14, а через клапаны 9, 11, 13 и дроссели 6 стравливается в атмосферу. С помощью дросселей 6 регулируется скорость поршней пневмоцилиндров и, соответственно, звеньев манипуляторов.

Устройство управления робота МП-9С выполнено, как уже было указано, в виде отдельной стойки и состоит из двух частей. В ниж-

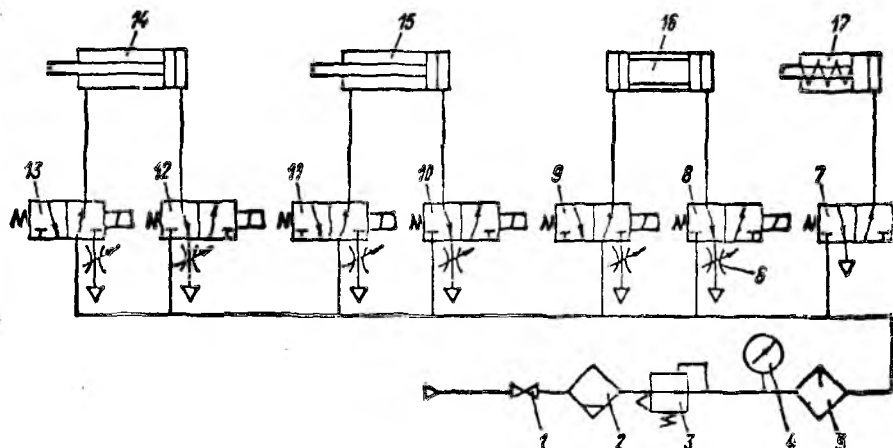


Рис. 4.7. Пневматическая схема промышленного робота МП-9С

ней части расположены блок подготовки воздуха и электроуправляемые воздухораспределители. На боковую поверхность стойки выведены штуцеры для подсоединения к пневмоцилиндрам манипулятора.

Верхняя часть содержит электронные блоки и лицевую панель устройства. На лицевой панели (рис. 4.8) расположены элементы ручного управления приводами робота и

ряд плоских многопозиционных переключателей ПМП-102, на которых набирается программа рабочего цикла робота и технологического оборудования. С помощью кнопок «Пуск» и «Стоп» производится запуск и остановка манипулятора в автоматическом режиме. Кнопка «Автомат-Наладка» предназначена для включения соответствующего режима работы. Остальные кнопки служат для ручного управления приводами манипулятора в режиме «Наладка»:

кнопка «Зажим-Разжим» — соответственно для сжатия и разжима пальцев схвата;

кнопка «Вверх-Вниз» — для подъема и опускания манипулятора;

кнопка «Выдвижение-Втягивание» — для выдвижения и втягивания схвата;

кнопка «Вправо-Влево» — для включения поворота манипулятора вокруг вертикальной оси.

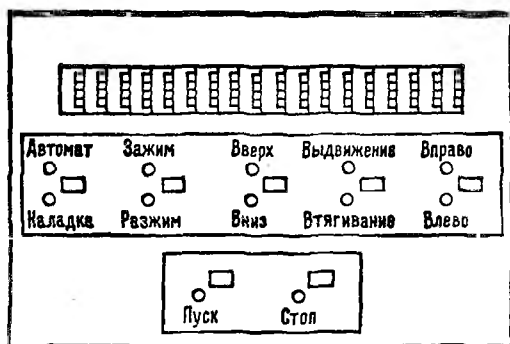


Рис. 4.8. Лицевая панель устройства управления промышленного робота МП-9С

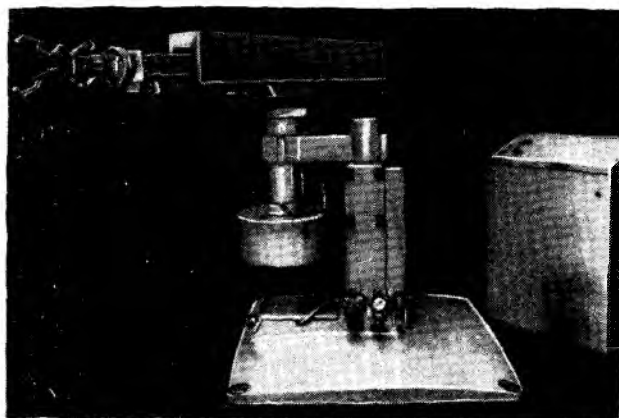


Рис. 4.9. Пневматический промышленный робот «МХУ Юниор» грузоподъемностью 5 кг фирмы «Электрорюкс» (Швеция)

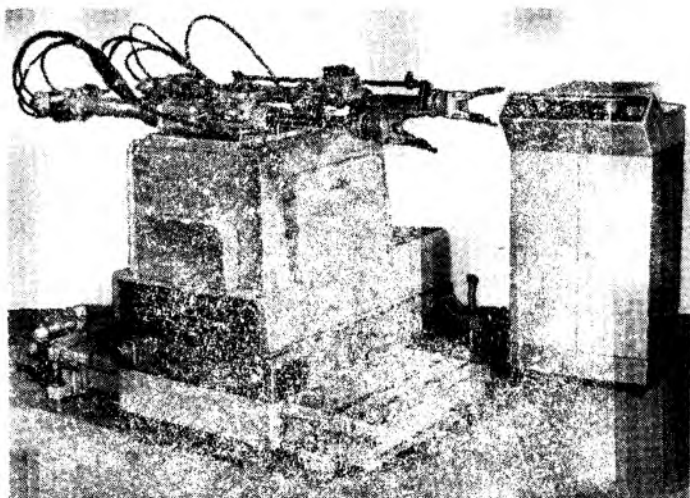


Рис. 4.10. Отечественный пневматический промышленный робот «Циклон 5» грузоподъемностью 5 кг

Кнопки снабжены сигнальными лампочками, высвечивающими заданные команды во всех режимах работы приводов манипулятора. На многопозиционных переключателях, показанных на рис. 4.8 сверху, набирается программа работы робота и другого работающего с ним оборудования. Каждая позиция переключателя соответствует одной команде на перемещение какого-либо одного звена манипулятора или одной команде на включение оборудования. В данном устройстве управления применены десятипозиционные переключатели, позиции которых соответствуют следующим командам: конец цикла (программы); выдвижение схвата; втягивание схвата; поворот манипулятора вправо; поворот манипулятора влево; подъем манипулятора; опускание манипулятора; зажим пальцев схвата; разжим пальцев схвата; пуск технологического оборудования.

На рис. 4.9 и 4.10 показаны примеры других пневматических промышленных роботов большей грузоподъемности.

4.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ

Как было указано в параграфе 4.1, гидроприводы нашли основное применение в тяжелых и сверхтяжелых роботах, 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. Несжимаемость



Рис. 4.11. Гидравлический промышленный робот с контурным управлением «Коат-а-Матик» фирмы «Ретаб» (Швеция)

жидкости, а также большее давление ее обеспечивают гидроприводу лучшие динамические, точностные и габаритные характеристики по сравнению с пневмоприводом.

Управление гидравлическими двигателями осуществляется с помощью золотников и клапанов, которые в свою очередь имеют обычно электрическое управление, т. е. представляют собой электрогидравлические усилители (ЭГУ).

В отличие от пневмоприводов для гидроприводов предусмотрен 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.

Гидроприводы чаще всего выполняют с контурным и позиционным управлением. Однако для роботов большой грузоподъемности, гидроприводы которых не имеют конкуренции со стороны других типов приводов, в случае необходимости применяют гидроприводы и с простым цикловым управлением.

На рис. 4.11 показан гидравлический промышленный робот «Коат-а-Матик» шведской фирмы «Ретаб», имеющий контурное управление и предназначенный для нанесения покрытий, сварки, зачистки и др. На рис. 4.11 робот имеет в качестве рабочего органа краскораспылитель. Робот состоит из трех частей — манипулятора, насосной станции и устройства управления (расположено в центре). На рис. 4.12 представлена общая схема механической части робота.

Техническая характеристика робота «Коат-а-Матик»
(рис. 4.12)

Число степеней подвижности	6
Переносные степени подвижности:	
поворот I, °	135
» II, °	90
» III, °	90
Ориентирующие степени подвижности:	
поворот IV, °	210
» V, °	210
вращение VI, °	359
Грузоподъемность, кг	15
Погрешность позиционирования, мм	4
Способ управления	Контурный
Масса, кг:	
манипулятора	250
насосной станции	175
устройства управления	110

Манипулятор, кинематическая схема которого представлена на рис. 4.13, имеет шесть степеней подвижности в угловой системе координат. Звенья манипулятора уравновешены с помощью пружин, что позволяет оператору легко перемещать манипулятор вручную за рукоятки у рабочего органа. Это необходимо для осуществления программирования робота методом обучения. Для уменьшения усилий на рукоятках ручного управления предусмотрен рычаг 10, с помощью которого можно расфиксировать вилку 24 относительно

стойки 8 в вертикальном направлении. При этом штоки 23 и 26 в гидроцилиндрах 21 и 9 не создают сопротивления при перемещении манипулятора в процессе обучения.

Механизм поворота манипулятора относительно вертикальной оси размещен в станине 22 манипулятора. Двигателем служит гидроцилиндр 18, гильза которого шарнирно соединена со станиной 22, а шток 19 — с кривошипом 17. Кривошип 17 прикреплен к вертикальному валу, заканчивающемуся в верхней части планшайбой 16.

Механизм качания манипулятора в плече выполнен в виде параллелограмма, состоящего из силовой стойки 8 и тяг 25, шарнирно связанных снизу кронштейном 20, а сверху — щеками 27. Двигателем является гидроцилиндр 21, гильза которого шарнирно прикреплена к кронштейну 20, а шток — к вилке 24. Как указано выше,

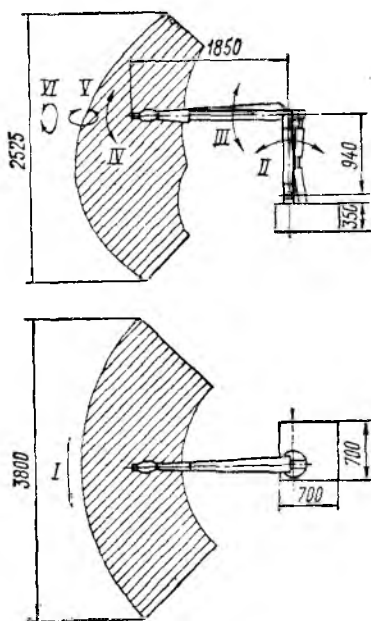


Рис. 4.12. Общая схема робота «Коат-а-Матик»

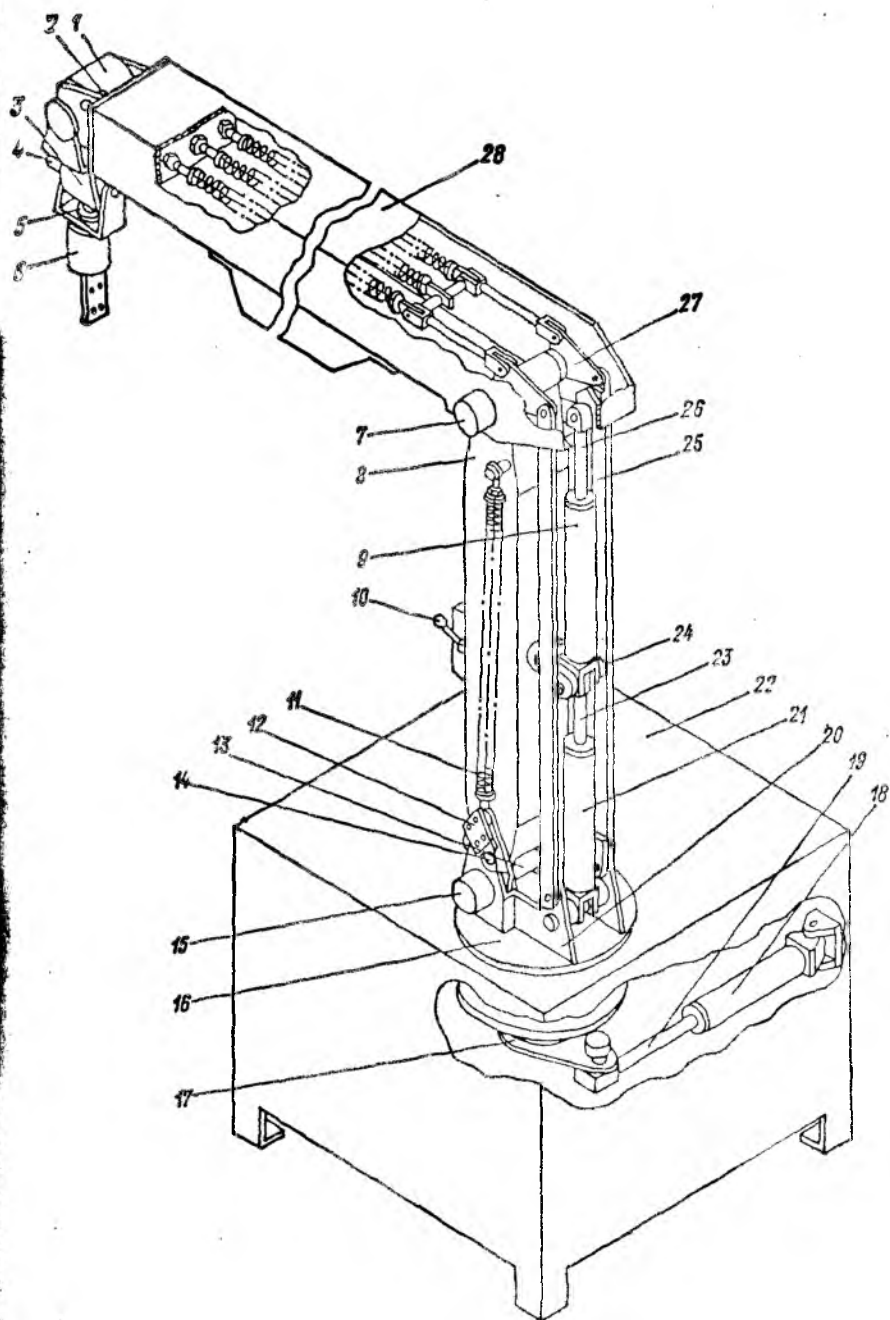


Рис. 4.13. Кинематическая схема робота «Коат-а-Матик»

вилка 24 при работе в автоматическом режиме жестко связана со стойкой 8, а в режиме обучения расфиксируется с помощью рычага 10.

Уравновешивание осуществляется пружинами 11, один конец которых с помощью серьги 12 прикреплен к кронштейну 20 эксцентрично относительно оси 13, а второй конец связан со стойкой 8. Серьга 12 снизу заканчивается вилкой, в которую входит штырь 14, связанный со стойкой 8. В зависимости от угла поворота стойки штырь отклоняет серьгу 12, уменьшая или увеличивая плечо пружины 11 относительно оси штыря 14. Датчиком обратной связи служит потенциометр 15.

Механизм качания в локте состоит из гидроцилиндра 9, гильза которого через вилку 24 связана со стойкой 8, а шток 26 — со звеном 28.

Уравновешивающие пружины 11 закреплены эксцентрично относительно оси качания звена 28. Потенциометр 7 обеспечивает обратную связь с устройством управления.

Ориентирующие степени подвижности выполнены в виде двух качательных пар и одной вращательной. Качательные пары выполнены на базе гидродвигателей 1 и 3, размещенных в соответствующих корпусных вилках. Датчиком обратной связи служат потенциометры 2 и 4.

Гидродвигатель 6, к выходному валу которого прикреплен держатель распылительной головки, играет роль вращательной степени подвижности. Датчиком обратной связи служит потенциометр 5.

Гидравлическая схема робота «Коат-а-Матик» представлена на рис. 4.14.

Насосом 8 переменной подачи масло через обратный клапан 6 нагнетается в ресивер 23 и через фильтр высокого давления 24 попадает в напорную магистраль.

Заданное давление масла поддерживается клапаном 10, управляемым реле давления 5, и контролируется по манометру 7. В случае аварийного падения давления масла в гидросистеме реле давления 5 отключает манипулятор. Из гидросистемы масло сливается в бак 9 через теплообменник 12 и фильтр 11. Насосная станция, выполненная в отдельном корпусе, соединяется с блоками распределителей, размещенными в станине, с помощью шлангов с быстроразъемными муфтами 13 и 22.

Каждый из приводов робота управляется соответствующим распределителем 3, 4, 14—16, 21. Переливные клапаны 1, 2, 17—20 при неработающем масляном насосе соединяют противоположные полости гидроцилиндров и гидродвигателей и позволяют перемещать рабочий орган в режиме обучения. При включении насоса за счет давления масла клапаны переключаются и соединяют двигатели с соответствующими распределителями.

Устройство управления контурного типа выполнено в отдельной стойке.

Программоносителем служит магнитный диск на 75 дорожек. Продолжительность записи одной дорожки 11 с. Рекомендуется за-

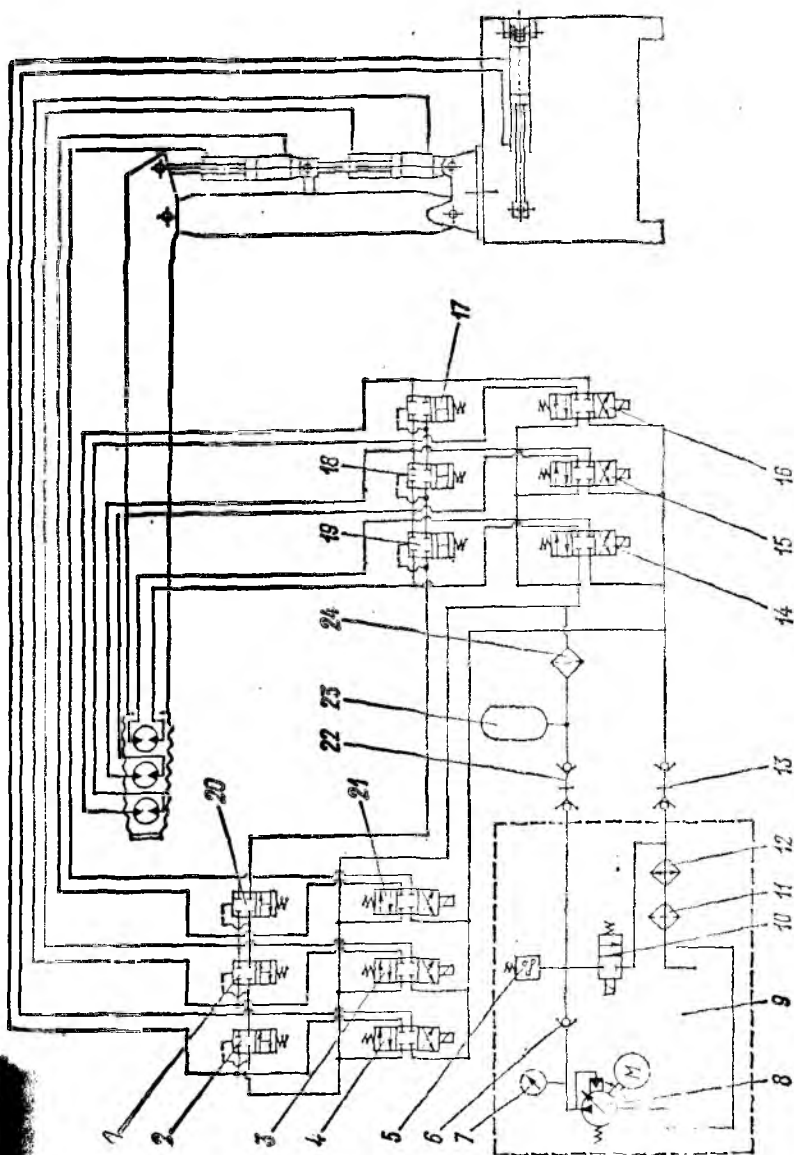


Рис. 4.14. Гидравлическая схема робота «Ксат-а-Матик»

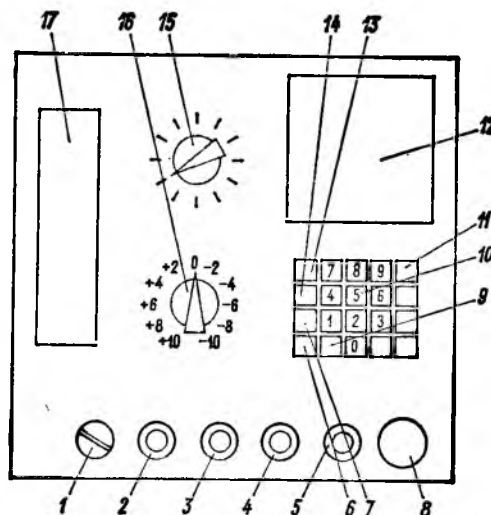


Рис. 4.15. Лицевая панель устройства управления робота «Коат-а-Матик»

писывать на одном диске не более четырех программ. Магнитофон 17 выведен на лицевую панель устройства управления (рис. 4.15). На лицевой панели расположены рукоятки и кнопки управления и дисплей оперативной индикации.

Питание на устройство подается с помощью переключателя 1. Управление электродвигателем масляного насоса осуществляется нажатием кнопок 2 и 3. Запуск в работу в автоматическом режиме производится с помощью кнопок 4 и 5. Аварийная остановка осуществляется при нажатии на клавишу 8.

Переключатель 15 предназначен для выбора режима работы манипулятора, включая режимы программирования, коррекции программ и автоматического воспроизведения. С помощью переключателя 16 можно изменить скорость отработки в интервале $\pm 10\%$.

Правый вертикальный ряд из четырех клавиш 11 предназначен для подачи краски нужного цвета к краскораспылителю (при многоцветной окраске), клавиша 13 — для включения краскораспылителя, клавиша 14 — для включения блокировки краскораспылителя, клавиша 7 — для включения манипулятора от внешнего оборудования, клавиша 6 — для включения внешних блокировок.

Клавиши 10, обозначенные на панели устройства управления цифрами от 0 до 9, предназначены для набора номеров дорожек, блокировок и команд, клавиша 9 — для включения с помощью клавиш 10 команды перехода на заданную магнитную дорожку, клавиша 8 — для включения команды записи в память.

Дисплей 12 обеспечивает индикацию номера магнитной дорожки, степень ее заполнения в процессе программирования, индикации номера команды, набранного на клавишах 10, индикацию номера обрабатываемой программы.

Кроме того, на дисплее индицируется информация о давлении масла в гидросистеме, об исправности масляного фильтра и т. д. Программирование осуществляется методом обучения. Для этого на рабочем органе манипулятора имеются две рукоятки: для ручного управления ориентирующими степенями подвижности, для управления переносными степенями подвижности. Оператор в ручном режиме окрашивает одно изделие. При этом траектория перемещения краскораспылителя автоматически записывается на магнитный диск.

Затем оператором вводятся необходимые блокировки и команды связи с внешним оборудованием.

При нажатии на кнопку 4 данная программа воспроизводится автоматически.

Прототипом робота «Коат-тик» является робот «Тралфа» из семейства роботов фирмы «Юнимейшн» (А). Робот «Тралфа» также имеет управление программой, осуществляемое методом

при арочных работах роботы «Коат-тик» и «Тралфа» наиболее эффективны для выполнения непрерывной шовной сварки.

К группе подобных гидравлических роботов с контурным устройством управления и кинематикой, аналогичной руке человека, относится отечественный робот К-20, предназначенный для нанесения теплозащитных покрытий, герметиков, клеев методом распыления. Робот имеет шесть степеней подвижности, в том числе предусмотренное перемещение манипулятора по напольным направляющим на расстоянии до 6 м со скоростью 0,25 м/с. Контурное устройство управления исполнено на базе мини-ЭВМ.

На рис. 4.16 показан манипулятор отечественного ПР СМ40Ц4301, предназначенного для обслуживания металлорежущих станков и транспортных конвейеров. На рис. 4.17 приведена его общая схема. Робот имеет пять степеней подвижности (включая перемещение стола) и работает в цилиндрической системе координат.



Рис. 4.16. Гидравлический промышленный робот с цикловым управлением СМ40Ц4301

Техническая характеристика робота СМ40Ц4301 (рис. 4.17)

Число степеней подвижности	5
Переносные степени подвижности:	
выдвижение I, мм (скорость выдвижения, мм/с)	40 (500)
поворот II, ° (скорость поворота, °/с)	90 (60)
выдвижение III, мм (скорость выдвижения, мм/с)	500 (500)
перемещение стола IV, мм (скорость перемещение, мм/с)	600 (500)
Ориентирующие степени подвижности: вращение V, ° (скорость вращения, °/с)	180 (120)
Грузоподъемность, кг	40
Погрешность позиционирования, мм	1,0
Способ управления	Цикловой
Количество кадров в программе	40
Масса, кг	1000

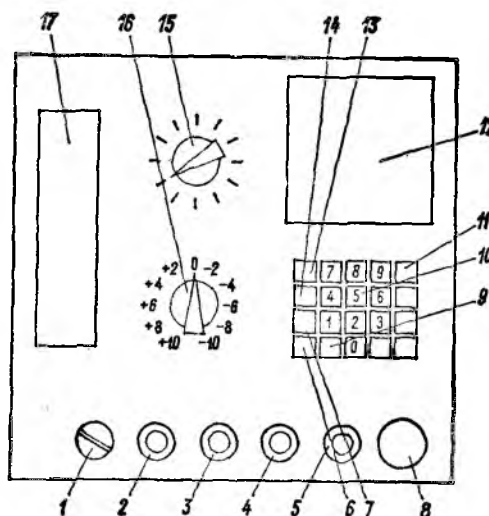


Рис. 4.15. Лицевая панель устройства управления робота «Коат-а-Матик»

писывать на одном диске не более четырех программ. Магнитофон 17 выведен на лицевую панель устройства управления (рис. 4.15). На лицевой панели расположены рукоятки и кнопки управления и дисплей оперативной индикации.

Питание на устройство подается с помощью переключателя 1. Управление электродвигателем масляного насоса осуществляется нажатием кнопок 2 и 3. Запуск в работу в автоматическом режиме производится с помощью кнопок 4 и 5. Аварийная остановка осуществляется при нажатии на клавишу 8.

Переключатель 15 предназначен для выбора режима работы манипулятора, включая режимы программирования, коррекции программ и автоматического воспроизведения. С помощью переключателя 16 можно изменить скорость отработки в интервале $\pm 10\%$.

Правый вертикальный ряд из четырех клавиш 11 предназначен для подачи краски нужного цвета к краскораспылителю (при многоцветной окраске), клавиша 13 — для включения краскораспылителя, клавиша 14 — для включения блокировки краскораспылителя, клавиша 7 — для включения манипулятора от внешнего оборудования, клавиша 6 — для включения внешних блокировок.

Клавиши 10, обозначенные на панели устройства управления цифрами от 0 до 9, предназначены для набора номеров дорожек, блокировок и команд, клавиша 9 — для включения с помощью клавиш 10 команды перехода на заданную магнитную дорожку, клавиша 8 — для включения команды записи в память.

Дисплей 12 обеспечивает индикацию номера магнитной дорожки, степень ее заполнения в процессе программирования, индикации номера команды, набранного на клавишах 10, индикацию номера обрабатываемой программы.

Кроме того, на дисплее индицируется информация о давлении масла в гидросистеме, об исправности масляного фильтра и т. д. Программирование осуществляется методом обучения. Для этого на рабочем органе манипулятора имеются две рукоятки: для ручного управления ориентирующими степенями подвижности, для управления переносными степенями подвижности. Оператор в ручном режиме окрашивает одно изделие. При этом траектория перемещения краскораспылителя автоматически записывается на магнитный диск.

В этом оператором вводятся необходимые блокировки и команды связи с внешним оборудованием.

При нажатии на кнопку 4 заданная программа воспроизводится автоматически.

Прототипом робота «Коат-матик» является робот «Тралфа» из семейства роботов «имейт» фирмы «Юнимейшн» (А). Робот «Тралфа» также имеет контурное управление и программируется методом обучения.

При сварочных работах роботы «Коат-а-Матик» и «Тралфа» более эффективны для выполнения непрерывной шовной работы.

К группе подобных гидравлических роботов с контурным устройством управления и кинематикой, аналогичной руке человека, относится отечествен-

ный робот ПРК-20, предназначенный для нанесения теплозащитных, лакокрасочных покрытий, герметиков, клеев методом распыления. Робот имеет шесть степеней подвижности, в том числе предусмотрено перемещение манипулятора по напольным направляющим на расстояние до 6 м со скоростью 0,25 м/с. Контурное устройство управления выполнено на базе мини-ЭВМ.

На рис. 4.16 показан манипулятор отечественного ПР СМ40Ц4301, предназначенного для обслуживания металлорежущих станков и транспортных конвейеров. На рис. 4.17 приведена его общая схема. Робот имеет пять степеней подвижности (включая перемещение стола) и работает в цилиндрической системе координат.

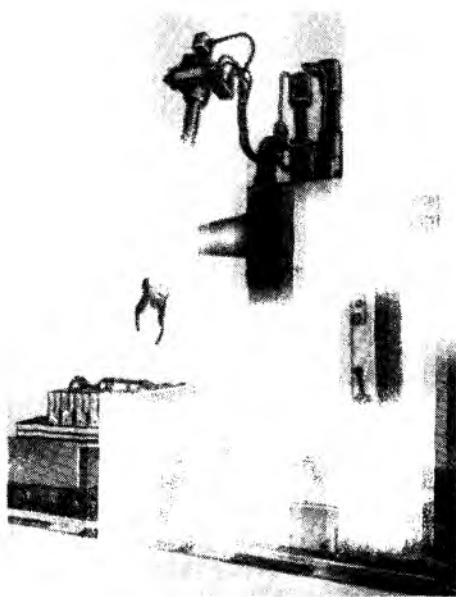


Рис. 4.16. Гидравлический промышленный робот с цикловым управлением СМ40Ц4301

Техническая характеристика робота СМ40Ц4301 (рис. 4.17)

Число степеней подвижности	5
Переносные степени подвижности:	
выдвижение I, мм (скорость выдвижения, мм/с)	40 (500)
поворот II, ° (скорость поворота, °/с)	90 (60)
выдвижение III, мм (скорость выдвижения, мм/с)	500 (500)
перемещение стола IV, мм (скорость перемещение, мм/с)	600 (500)
Ориентирующие степени подвижности: вращение V, ° (скорость вращения, °/с)	180 (120)
Грузоподъемность, кг	40
Погрешность позиционирования, мм	1,0
Способ управления	Цикловой
Количество кадров в программе	40
Масса, кг	1000

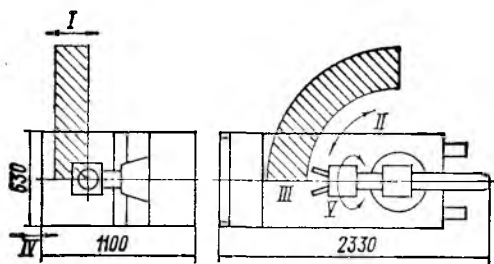


Рис. 4.17. Схема робота СМ40Ц4301

Кинематическая схема робота приведена на рис. 4.18. Двигателями в приводах степеней подвижности являются гидроцилиндры. В приводе выдвижения манипулятора (перемещение вдоль оси центров станка) шток гидроцилиндра 13 связан с выдвижной пинолью 1. Привод поворота манипулятора выполнен в виде реечной пары.

Рейка-шток гидроцилиндра 11 сцеплена с сектором 12, прикрепленным к пиноли 1. Поворот пиноли задается на блоке упоров 14, за счет поворота которого с помощью гидроцилиндра 16 можно получить три точки позиционирования.

Выдвижение схвата осуществляется гидроцилиндром 10, рейка-шток которого сцеплен с зубчатым колесом 6, закрепленным на валу, проходящем внутри пиноли 1. Затем вращение через шестерни 3 и 5 передается на шестерню 4, сцепленную с рейкой 7, распо-

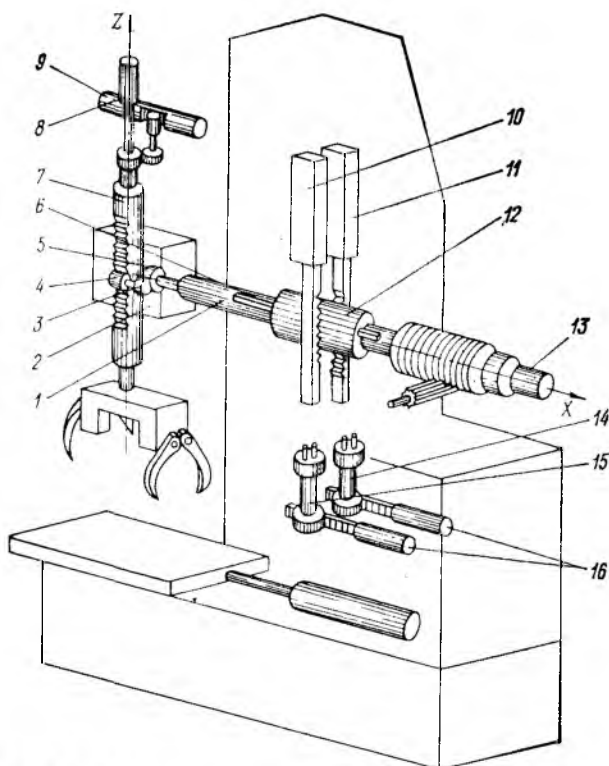


Рис. 4.18. Кинематическая схема робота СМ40Ц4301

ложенной в корпусе 2. Выдвижение задается на блоке упоров 15, с помощью которого при повороте можно получить три точки позиционирования.

Вращение схвата осуществляется от гидроцилиндра 9: перемещение штока с помощью реечной передачи преобразуется во вращательное движение и через зубчатую пару передается на вал, проходящий внутри рейки 7. Закрытие и раскрытие губок схвата осуществляются от гидроцилиндра 8.

Устройство управления робота состоит из командоаппарата и блоков упоров. Командоаппарат определяет последовательность отработки степеней подвижности, а на двух блоках упоров задаются поворот манипулятора и выдвижения схвата. Барабан командоаппарата быстросъемный; программа может быть набрана вне манипулятора.

Скорость перемещения звеньев манипулятора регулируется системой дросселей. Для плавного изменения скорости в конце поворота манипулятора и выдвижения схвата использованы демпферы золотникового типа, состоящие из подпружиненного золотника, перемещающегося в корпусе, и шарикового обратного клапана, предназначенного для свободной подачи масла в цилиндр в начале обратного хода поршня.

При движении поршня масло свободно проходит через демпфер (золотник открыт). При подходе к блоку упоров шток цилиндра перемещает весь блок в осевом направлении. Это приводит к перемещению золотника, который дросселирующими кромками перекрывает поток масла. Конфигурация и параметры дросселирующих пазов золотника рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить в процессе торможения скорость замедления, близкую к постоянной, а на последних 1,5 мм пути — движение поршня с постоянной скоростью.

Робот оснащен набором быстросменных захватных устройств. Он может иметь индивидуальную гидростанцию или работать от гидростанции обслуживаемого им оборудования.

Робот СМ40Ц4301 является базовой моделью гаммы роботов типа СМ40Ц4300. Набор унифицированных агрегатных узлов позволяет комплектовать роботы одним или двумя манипуляторами с различными числом степеней подвижности и значениями ходов исполнительных органов. Совокупность всех возможных компоновок манипуляторов обеспечивает возможность обслуживания металлорежущих станков токарной группы в номенклатуре из 20 моделей.

4.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ

В промышленных роботах нашли применение электроприводы следующих типов:

на двигателях постоянного тока с аналоговым и цифровым управлением;

на асинхронных двигателях как нерегулируемых (с цикловым управлением), так и с частотным управлением;

на шаговых двигателях;

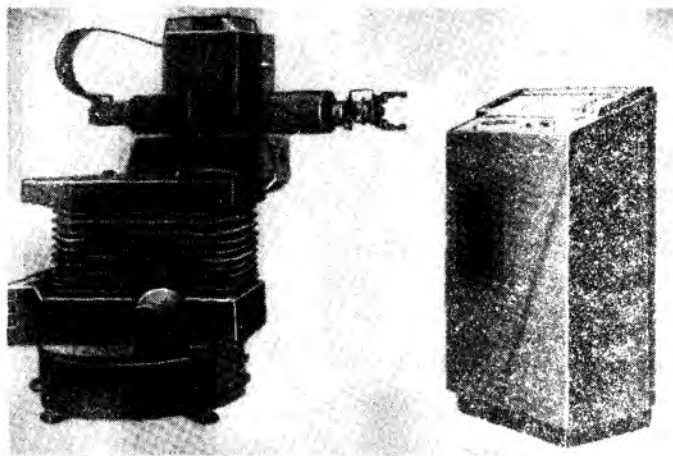


Рис. 4.19. Электромеханический промышленный робот с позиционным управлением «Универсал-5»

на различного типа регулируемых муфтах в сочетании с нерегулируемым асинхронным двигателем или двигателем постоянного тока;

на электромагнитах (соленоидных и других типов).

В основном применяют электроприводы с наиболее традиционным угловым перемещением, т. е. вращающиеся. Однако в связи с распространением в роботах поступательных перемещений наряду с электроприводами, основанными на вращающихся двигателях в комбинации с механизмами, преобразующими вращательное движение в поступательное (типа передачи шестерня—рейка и т. п.), используют специальные линейные приводы постоянного и переменного тока.

Состав электроприводов для роботов обычен, и в общем случае в него входят электродвигатель, снабженный датчиками обратной связи по положению и скорости, механическая передача, часто тормоз и иногда муфта (например, для защиты двигателя от перегрузки), а также устройство управления.

На рис. 4.19 показан один из первых отечественных электромеханических роботов общепромышленного применения «Универсал-5». Его основное применение — обслуживание различного технологического оборудования и выполнение других аналогичных вспомогательных операций.

Робот состоит из манипулятора с шестью степенями подвижности, устройства управления позиционного типа и блока подготовки воздуха для пневмоприводов, используемых в ориентирующих степенях подвижности манипулятора.

Техническая характеристика робота «Универсал-5» (рис. 4.20)

Число степеней подвижности	6
Переносные степени подвижности:	
подъем I , мм (скорость подъема, мм/с) . . .	800 (600).

поворот, ° (скорость поворота, °/с)	
II	330 (60)
III	240 (90)
выдвижение IV, мм (скорость выдвижения, мм/с)	700 (800)
Ориентирующие степени подвижности:	
вращение V, ° (скорость вращения, °/с) . .	180 (180)
поворот VI, ° (скорость поворота, °/с) . .	90 (90)
Грузоподъемность, кг	5
Погрешность позиционирования, мм	2
Способ управления	Позиционный
Число кадров в программе	50
Масса манипулятора, кг	650

Манипулятор робота «Универсал-5» работает в цилиндрической системе координат и имеет четыре переносные и две ориентирующие степени подвижности. Переносные степени подвижности оснащены электромеханическим приводом на базе электродвигателей постоянного тока (типа СЛ). Датчиками положения в степенях подвижности служат проволочные потенциометры (типа ППМЛ).

В механизме подъема манипулятора, выполненного в виде четырехзвенного пантографа, применены уравнивающие пружины, позволившие снизить мощность электродвигателя, а также значительно сгладить неравномерность нагрузки на электродвигатель при работе пантографного механизма.

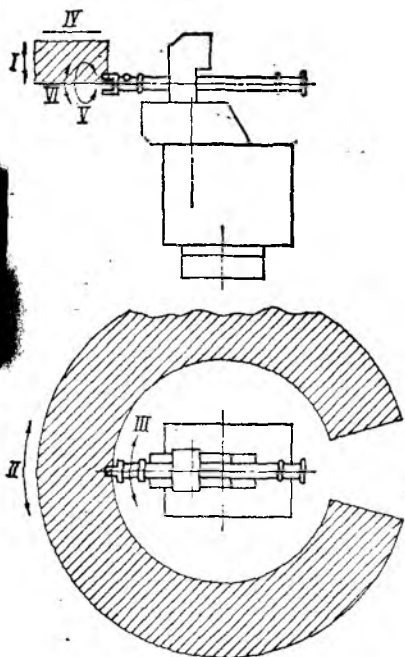


Рис. 4.20. Схема робота «Универсал-5»

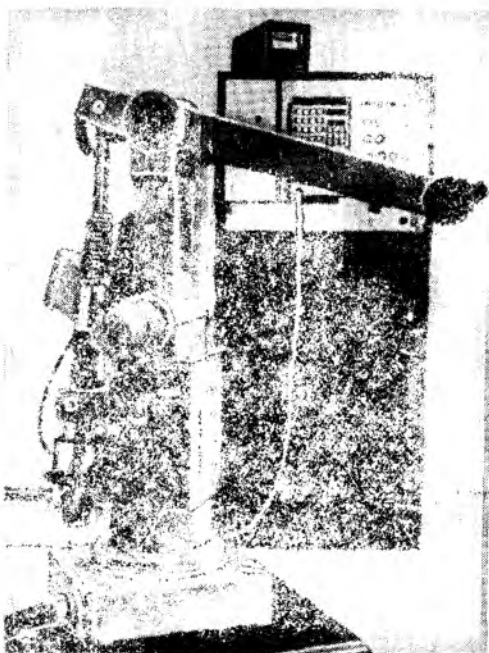


Рис. 4.21. Электромеханический промышленный робот с позиционно-контурным управлением фирмы АСЕА (Швеция)

Ориентирующие степени подвижности снабжены пневмоцилиндрами с цикловым управлением, которое осуществляется с помощью малогабаритных воздушораспределителей с электромагнитным управлением. Углы поворота по этим степеням подвижности определяются регулируемыми жесткими упорами.

Программонесителем в устройстве управления является барабан со штырьками, имеющий 50 рядов отверстий. Задатчиками перемещений по переносным степеням подвижности служат потенциометры ППМЛ, установленные на лицевой панели устройства.

На рис. 4.21 показан известный электромеханический робот ИР6-6 фирмы АСЕА (Швеция) с позиционно-контурным управлением. Он применяется как для обслуживания станков и другого технологического оборудования, так и для выполнения основных технологических операций, например сварки, окрасочных работ, шлифования, снятия заусенцев.

Техническая характеристика робота ИР6-6 (рис. 4.22)

Число степеней подвижности	5
Переносные степени подвижности:	
поворот I, ° (скорость поворота, °/с)	340 (95)
» II, ° (скорость выдвижения, м/с)	80 (0,75)
» III, ° (скорость подъема, м/с)	65 (1,1)
Ориентирующие степени подвижности:	
поворот IV, ° (скорость поворота, °/с)	180 (115)
вращение V, ° (скорость вращения, °/с)	360 (195)
Грузоподъемность, кг	6
Погрешность позиционирования, мм	0,2
Способ управления	Позиционно-контурный
Масса манипулятора, кг	125

Робот состоит из конструктивно выполненных отдельно манипулятора и устройства управления. Манипулятор, кинематическая схема которого показана на рис. 4.23, имеет пять степеней подвижности и работает в сферической системе координат. Манипулятор содержит механизм поворота относительно вертикальной оси, механизм радиального выдвижения, механизм подъема и механизмы ориентирующих перемещений рабочего органа.

Механизм поворота относительно вертикальной оси выполнен в виде мотор-редуктора 2, связанного с основанием 1. Редуктор выполнен в виде волновой передачи 3, жесткое колесо которой связано с поворотным корпусом 5.

На поворотном корпусе 5 шарнирно закреплены мотор-редуктор 4 и параллелограмм механизма радиального выдвижения рабочего органа. Параллелограмм состоит из двух вертикальных тяг 9, 10 и двух горизонтальных тяг 7, 12, причем тяга 10 образует вертикальную, а тяга 12 горизонтальную часть манипулятора. С тягой 7 через шариковую передачу 6 связан выход мотор-редуктора 4, с помощью которого осуществляются поворот тяги 7 горизонтальной части манипулятора 12 и соответственно подъем и опускание рабочего органа.

Радиальное выдвижение производится с помощью мотор-редуктора 20, шарнирно закрепленного на корпусе 5, и через шариковинтовую пару 18, связанную с вертикальной частью манипулятора 10.

Несмотря на работу манипулятора в сферической системе координат, подъем и опускание рабочего органа происходят вертикально, а радиальное выдвижение — горизонтально. Это достигается за счет согласованной работы двух приводов, осуществляемой автоматически устройством управления. Для разгрузки приводов предусмотрен уравновешивающий груз 8.

Механизмы ориентирующих степеней подвижности состоят из мотор-редукторов 17, установленных соосно с нижним шарниром, тяги 10, системы тяг 11, 14 и кривошипов 13, 15, 19, образующих два параллельных транслятора из двух параллелограммов.

Поворот рабочего органа осуществляется непосредственно последним кривошипом 15, а вращение формируется от параллельного кривошипа за счет безлюфтовой конической передачи 16. Такой транслятор обеспечивает постоянное (например, горизонтальное) положение рабочего органа независимо от углового положения вертикальной и горизонтальной частей манипулятора.

Все степени подвижности оснащены датчиками положения, построенными на фазоаналоговом принципе. Сигнал рассогласования по положению формируется как разность фаз между сигналом с датчика обратной связи и задающим сигналом.

Устройство управления робота может работать в трех режимах: «от точки

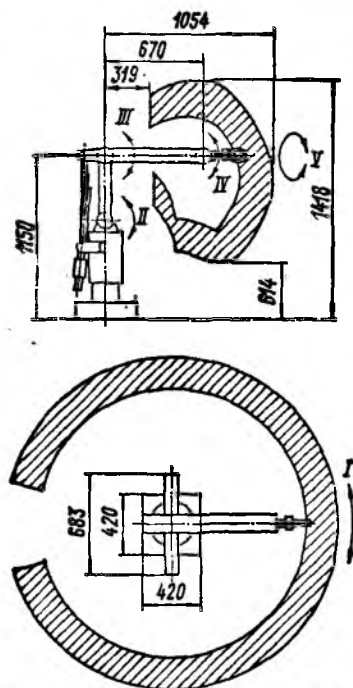


Рис. 4.22. Схема робота ИР6-6

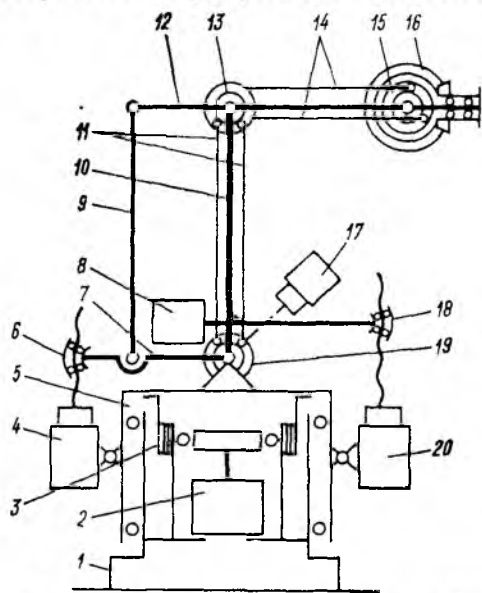


Рис. 4.23. Кинематическая схема робота ИР6-6

к точке точно», «от точки к точке грубо», «от точки к точке линейно».

Режим «от точки к точке точно» обеспечивает точное позиционирование. Рабочий орган перемещается за счет одновременной отработки двух приводов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Кроме того, при оснащении рабочего органа датчиком обнаружения предмета устройство управления может работать в режиме поиска неориентированных предметов.

Режим «от точки к точке грубо» используется при обходе препятствий и позиционировании в точке ожидания.

При программировании в режимах «от точки к точке точно» и «от точки к точке грубо» при ручном управлении можно задавать четыре установки скорости каждой из степеней подвижности манипулятора: 1) перемещение на одну дискрету датчика положения, 2) малая скорость (1,2 % максимальной), 3) средняя скорость (6 % максимальной), 4) высокая скорость (50 % максимальной).

При воспроизведении программы с помощью переключателя можно задать восемь уставок скоростей: от 1,2 до 100 % максимальной.

В режиме «от точки к точке линейно» скорость устанавливается как время перемещения из предыдущей точки позиционирования в заданную в пределах от 0,1 до 9,9 с с шагом 0,1 с. При этом каждая из степеней подвижности будет перемещаться с постоянной скоростью, причем все степени подвижности достигнут заданного положения одновременно за установленное время.

4.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРИВОДЫ

Стремление максимально использовать и объединить достоинства отдельных типов приводов, а также скомпенсировать некоторые их недостатки привело к разработке и применению в роботах комбинированных приводов.

На рис. 4.24 показана схема комбинированного пневмогидравлического привода, в котором гидроцилиндр, действующий парал-

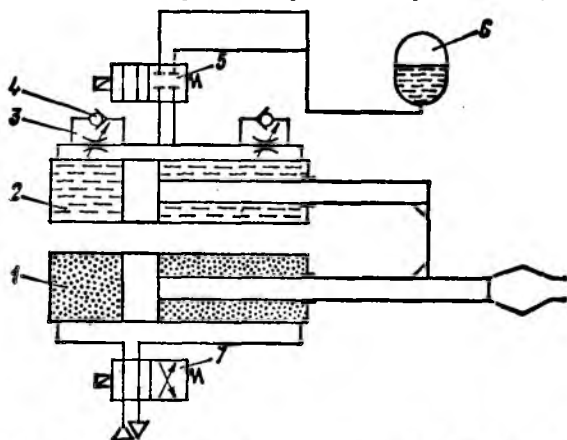


Рис. 4.24. Схема пневмогидравлического привода

тельно основному исполнительному пневмоцилиндру, обеспечивает коррекцию скорости выходного звена и его конечного положения.

Воздух под давлением поступает из магистрали в одну из полостей пневмоцилиндра 1 через пневмораспределитель 7. В результате происходит перемещение поршня со штоком, скорость которого определяется настройкой гидродросселей 3. (При этом гидрораспределитель 5 находится в правом положении, соединяя обе полости гидроцилиндра.) Обратные клапаны 4 обеспечивают свободный

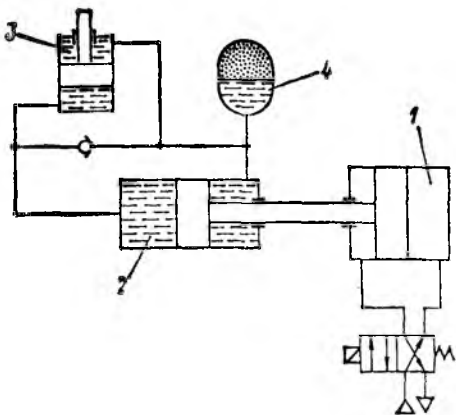


Рис. 4.25. Схема гидропневматического привода

доступ жидкости в заполняемую полость гидроцилиндра 2. Для компенсации разности объемов полостей гидроцилиндра и пополнения утечек масла в схеме предусмотрен масляный аккумулятор 6. Гидрораспределитель 5 может выполнять роль гидрозамка, фиксирующего положение манипулятора. Если в качестве дросселей 3 применить дроссели с пропорциональным электрическим управлением (типа ДД), то рассматриваемый привод при наличии обратной связи по положению можно использовать в промышленных роботах с позиционным управлением.

Существуют аналогичные пневмоэлектрические приводы, в которых вместо гидропривода применен электропривод.

На рис. 4.25 приведена принципиальная схема гидропневматического привода. Введение здесь пневмоцилиндра перед основным исполнительным гидроцилиндром позволяет отказаться от гидронасосной станции. При подаче воздуха в поршневую полость пневмоцилиндра 1 создается давление в поршневой полости гидроцилиндра 2 и жидкость из нее поступает в исполнительный гидроцилиндр 3. В результате поршень его перемещается, обеспечивая движение манипулятора. При движении поршня пневмоцилиндра в обратном направлении соответственно изменяется направление движения поршня в гидроцилиндрах 2 и 3. Емкость 4 служит для компенсации разности объема штоковой и поршневой полостей цилиндра 2, а также утечки жидкости.

Широкое применение нашли комбинированные гидроэлектрические приводы, в которых последовательно соединены маломощный электрический и выходной гидравлический приводы. Электропривод преобразует входной электрический сигнал в перемещение, которое служит входным воздействием для гидроусилителя гидропривода. Электрический привод может быть замкнутым следящим или разомкнутым на базе шагового двигателя.

5.1. СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В параграфе 3.5 даны общие сведения о системах управления роботами и их классификация, в основе которой лежит разделение их по способу управления на системы программного, адаптивного и интеллектуального управления, а по типу реализуемого ими движения на цикловые, позиционные и контурные. В этом параграфе рассмотрим системы программного управления.

На рис. 5.1 приведена обобщенная схема такой системы. На пульте управления задаются режимы работы, индицируется состояние робота и его устройства управления. В запоминающем устройстве находятся рабочие программы. Блок управления положением обеспечивает отработку заданных точек и траекторий приводами робота и работающего совместно с ним другого оборудования. Блок управления переходами контролирует окончание отработки предыдущего шага программы, хранит номер обрабатываемого шага и выдает сигнал на отработку следующего шага. Временное устройство формирует необходимые по программе выдержки времени. Запоминающее устройство, блок управления переходами и временное устройство в совокупности составляют программно-временное устройство, являющееся основой устройства программного управления.

На рис. 5.1 показаны связи устройства управления с оператором, приводами звеньев манипуляторов и устройства передвижения робота с возможным внешним оборудованием, а также внутренние связи между отдельными блоками устройства.

В работе робота имеются два основных режима: режим *программирования* и режим *воспроизведения* программы.

Для рассматриваемого типа робота, работающего по жесткой программе, оператор является единственным источником внешней информации о требуемых действиях, которая вводится в виде программы в запоминающее устройство и которую робот должен затем обрабатывать в автоматическом режиме, уже не получая никакой другой информации извне. В связи с этим перед началом программирования оператор определяет порядок всех действий робота, составляет программу функционирования и вводит ее в память устройства управления.

Возможны следующие методы составления и ввода программы (применительно к управлению манипулятором робота):

- 1) аналитическое программирование путем расчета программы и последующего ввода ее в запоминающее устройство (последователь-

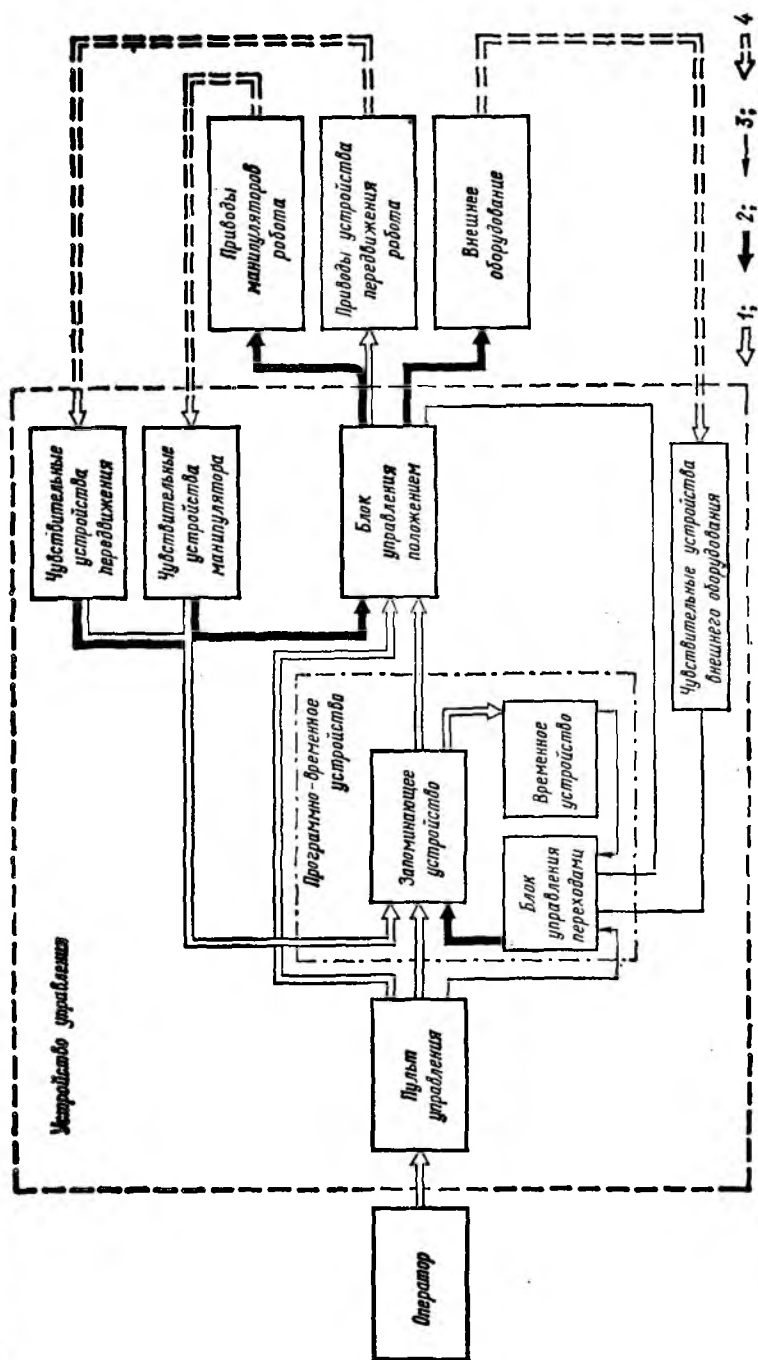


Рис. 5.1. Схема системы программного управления роботом:

1 — программирование; 2 — воспроизведение; 3 — подтверждение отработки, командные сигналы; 4 — механические связи

ность прохождения информации в этом случае такая: оператор — пульт управления — запоминающее устройство);

2) программирование методом обучения с одновременным вводом программы путем однократного (образцового) выполнения операции в режиме ручного управления роботом с помощью пульта (ручное управление осуществляется в последовательности: оператор — пульт управления — блок управления положением — манипулятор, а ввод программы — в последовательности: чувствительные устройства манипулятора — запоминающее устройство; путь прохождения команды на ввод информации: пульт управления — блок управления переходами — запоминающее устройство);

3) программирование методом обучения, но путем механического перемещения манипулятора рукой человека-оператора; ввод программы осуществляется так же, как и в предыдущем случае.

Для программирования последним методом требуется специальная конструкция манипулятора с уравниванием его масс и с обеспечением возможности отключения приводов, чтобы они не препятствовали перемещению манипулятора непосредственно рукой оператора.

Очевидным достоинством программирования методом обучения является его простота, а недостаток связан с тем, что для составления программы используется сам робот и, следовательно, на это время он выключается из производственного процесса. Кроме того, этот метод не универсален и поэтому не всегда применим. Например, он не пригоден для программирования сборочных и других операций, выполняемых одновременно несколькими манипуляторами.

В режиме воспроизведения, т. е. автоматической работы по программе, сигналы с выхода устройства управления поступают на приводы манипуляторов, устройства передвижения робота и внешнего оборудования, которые под воздействием этих сигналов совершают заданные программой движения.

Очевидно, что программная информация должна включать три вида информации: *информацию о положении*, т. е. о требуемых позициях для каждой степени подвижности; *информацию о последовательности* этих позиций, которая связывает их в общем движении манипулятора; *информацию о времени*, которая определяет темп движения манипулятора во времени. Соответственно с этим программная информация организована в определенную структуру, содержащую блоки информации о положении, командах перехода и времени.

Простейшей единицей программной информации является число (*команда*), представленное в дискретной или аналоговой форме и соответствующее единичной операции, выполняемой роботом (перемещение одного звена манипулятора, открывание-закрывание его захватного устройства, выдержка времени, выдача внешней команды). В зависимости от характера единичной операции ей соответствует число, содержащее от одного бита информации (операции типа «Включить — Выключить») до 13—14 бит для операции точного перемещения звена манипулятора.

Группе единичных операций, имеющих законченный смысл (например, перемещение рабочего органа манипулятора в определенную точку в результате одновременной работы его звеньев), соответствует группа чисел, объединенная общими условиями воспроизведения, — *кадр*. Кадры могут объединяться в подпрограммы, соответствующие законченной небольшой последовательности действий робота.

Порядок выдачи на обработку чисел, кадров и подпрограмм при воспроизведении программы определяется заложенным в устройство управления принципом воспроизведения: а) по жесткой последовательности; б) с возможностью изменения последовательности воспроизведения по каким-то внутренним или внешним (по отношению к роботу) условиям.

Внутренние условия задаются через пульт управления или записываются в запоминающем устройстве. Управление по внутренним условиям создает дополнительные функциональные возможности (например, многократная обработка отдельных участков программы по заданному в счетчике числу, модификация отдельных команд программы по номеру обрабатываемого цикла и т. п.). Работа по внутренним условиям тоже является работой по жесткому алгоритму, так как внутренние условия, заданные оператором, не изменяются в процессе обработки. Типичным примером работы по внутренним условиям является упорядоченная раскладка предметов в тару, когда необходимо считать число уложенных предметов и от цикла к циклу изменять координаты очередной ячейки тары.

Информация о внешних условиях поступает в устройство управления робота в виде сигналов о ходе протекания какого-либо внешнего процесса, в котором участвует робот, и позволяет ему в процессе работы переходить на другую программу, обрабатывать или пропускать отдельные участки программы, изменять отдельные команды программы, переходить на работу по внутренним условиям и т. п. Это позволяет гибко реагировать на те изменения в этом процессе, возможность которых была заранее предусмотрена при программировании робота. Управление по небольшому числу (5—10) сигналов о внутренних и внешних условиях предусматривается почти во всех современных устройствах управления роботов общепромышленного применения. Сигналы о внутренних и внешних условиях поступают в блок управления переходами устройства управления (рис. 5.1) и изменяют номер следующей обрабатываемой команды.

Устройство блока управления переходами определяется принятым принципом выработки сигнала о конце обработки очередного кадра и готовности к обработке следующего. Существуют три следующих таких принципа: по сигналам датчиков, временной и комбинированный.

В первом случае выполнение единичных операций предыдущего шага подтверждается срабатыванием датчиков либо сигналом с блока управления положением, во втором случае сигнал о переходе к следующему шагу вырабатывается временным устройством по истечении определенного промежутка времени. В третьем случае попеременно

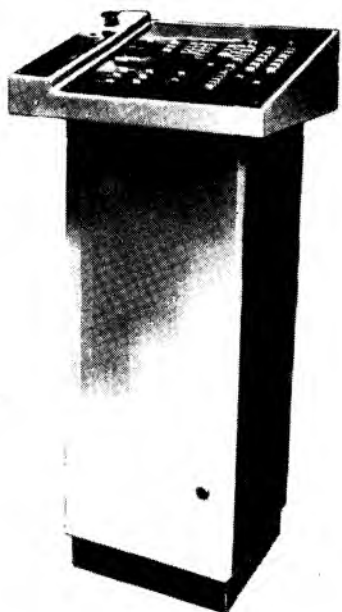


Рис. 5.2. Унифицированное устройство циклового программного управления УЦМ-663 для промышленных роботов

(для различных шагов) используются оба способа.

При временном принципе выработки сигнала о переходе датчиков не требуется. Сигналы перехода программы вырабатываются или временным устройством, запускаемым в начале каждого шага, или тактирующим устройством, запускаемым в начале цикла отработки. Фактическое подтверждение отработки в этом случае отсутствует.

Обычно блок управления переходами включает счетчик шагов, коммутатор переходов в программе и схемы совпадения сигналов отработки.

Рассмотрим особенности систем программного управления роботами, реализующих разные способы управления — цикловой, позиционный и контурный.

Системы циклового управления. Как уже упоминалось, это простейший способ программного управления, когда по каждой степени подвижности программируется, как правило, одно конечное положение. Информация об этом положении запоминается путем

установки механических упоров (или флажков путевых выключателей) на звеньях манипулятора. Примеры роботов с таким управлением даны в гл. 4, где рассмотрены пневматические роботы МП-9С, «МХУ Юниор», «Циклон 5» и гидравлический робот СМ40Ц4301. Информация о последовательности запоминается при таком управлении с помощью штекерных панелей, программных барабанов, многопозиционных переключателей и других коммутационных элементов. Информация о времени задается обычно на потенциометрах и отрабатывается временными устройствами типа реле времени.

Показанное на рис. 5.2 серийно выпускаемое отечественной промышленностью унифицированное устройство циклового управления УЦМ-663 для промышленных роботов обеспечивает управление манипуляторами, имеющими до шести степеней подвижности с числом точек позиционирования по каждой степени до четырех. Предусмотрена возможность увеличения числа точек позиционирования по двум степеням до восьми. Общее число точек позиционирования по всем степеням подвижности — не более 24. Устройство принимает сигналы с датчиков положения (контактных или бесконтактных) в виде напряжения постоянного тока 24 В. При необходимости осуществлять предварительное снижение скорости движения при подходе к точке позиционирования можно установить дополнительно датчик сигнала замедления скорости движения.

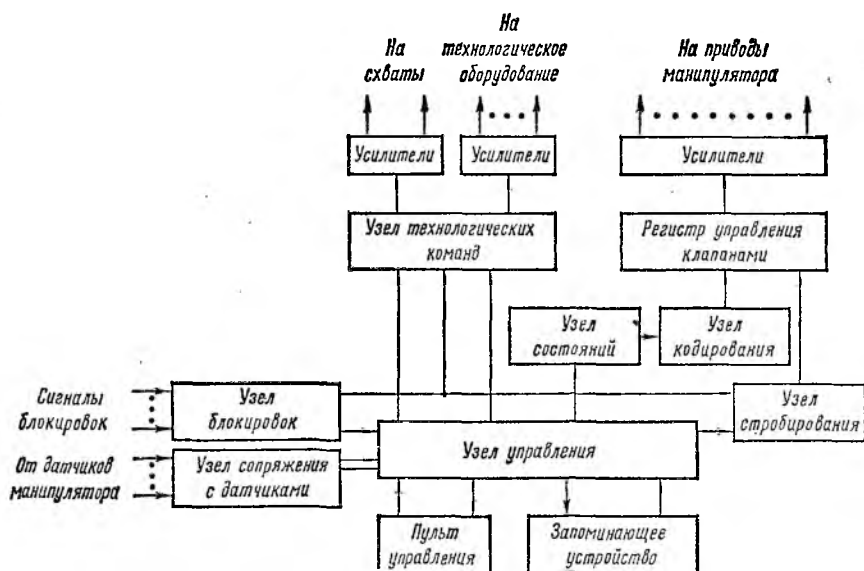


Рис. 5.3. Структурная схема устройства циклового управления УЦМ-663

Устройство УЦМ-663 (рис. 5.2) может выдавать команды типа «Включено-Выключено» на 12 единиц технологического оборудования. Одновременно могут выдаваться по две команды. Обработка осуществляется с подтверждением.

Команды управления электромагнитами клапанов манипулятора и технологические команды выдаются в виде напряжения постоянного тока 24 В или напряжения переменного тока 110 В мощностью 50 Вт.

В устройстве могут быть запрограммированы выдержки времени в диапазоне 0,1—3 с с дискретностью 0,1 с. Предусмотрено масштабирование дискретности (и выдержки времени) в два—десять раз.

Имеется возможность многократной обработки отдельных частей программы по внутренним условиям (числу циклов, заданному в счетчике), а также изменения хода программы по семи внешним условиям. В устройстве предусмотрены блокировка аварийных ситуаций по внешним сигналам и блокировка по запрещенным сочетаниям положений звеньев манипулятора.

Структурная схема устройства представлена на рис. 5.3. На схеме показаны основные информационные связи устройства.

Устройство выполнено в виде набора функциональных узлов с общим управлением от узла управления, реализованного в виде микропрограммного автомата. Программа работы с пульта управления записывается в запоминающее устройство емкостью 128 восьмизначных слов. Каждая единичная операция записывается в одном слове. Заложена возможность программирования девяти команд различного типа: «Позиционирование звена», «Технологическая команда» (включая управление схватами), «Выдержка времени»,

«Совместная обработка команд», «Обращение к подпрограммам», «Конец подпрограммы», «Управление циклом», «Конец цикла», «Останов».

Старшие разряды восьмиразрядного слова отведены под команды, младшие разряды — информационные, восьмой разряд — контрольный. Например, у команды «Позиционирование» в первом разряде записывается код команды «0», во втором — направление движения, в третьем — пятый разряд указывает номер степени подвижности, а в шестом и седьмом — номер точки на степени подвижности. У команды «Выдержка времени» код команды «100» занимает три первых разряда, а в четвертом — седьмом разрядах указывается величина выдержки.

Команда «Совместная обработка» позволяет компоновать кадры различной длины. Минимальная длина кадра — одна единичная операция, максимальная — восемь единичных операций. Число единичных операций указывается в информационной части команды «Совместная обработка».

Восьмиразрядные коды единичных операций из запоминающего устройства поступают в узел управления, где расшифровываются код команды, информация о части кода и обеспечивается обработка указанной операции.

Сигналы датчиков положения звеньев манипулятора выводятся через узел управления датчиками. Узел принимает сигналы 48 датчиков, периодически выходя из группы датчиков каждой степени подвижности к шифратору. Выход шифратора — код номера датчика. Номер датчика указывается в трех старших разрядах, а номер датчика в младшем разряде (замедления или останова). Номер передаваемой степени подвижности передается из узла управления.

В узле управления сравниваются заданный программой и фактический номер датчика положения и вырабатываются сигналы управления на клапаны манипулятора.

Устройство может выдавать управляющие сигналы на 24 управляемых гидро- или пневмоклапана манипулятора. При этом для различных гидро- и пневмосхем можно обеспечивать различные сочетания включения клапанов. Это достигается с помощью узла состояний и узла кодирования. Узлы выполнены в виде диодных матриц, распаиваемых в соответствии с таблицей включения клапанов конкретного манипулятора. Таким образом обеспечивается согласование устройства управления со схемами манипуляторов, имеющими любую логику включения клапанов.

Управляющие сигналы на манипулятор также формируются последовательно по степеням подвижности. Управление последовательностью формирования управляющих сигналов ведется по сигналам узла стробирования путем поочередной записи в регистр управления клапанами сигналов управления по каждой степени подвижности.

Управление технологическим оборудованием и захватным устройством манипулятора осуществляется узлом технологических команд.

не получения подтверждения о прохождении команды выдается сигнал в узел управления.

Выдержка времени вырабатывается в счетчике, находящемся в узле управления, вычитанием единиц из записанной в счетчик выдержки времени.

Выполнение опросов сигналов с датчиков, формирование команд включения-выключения на клапаны в процессе отработки осуществляется циклически с высокой частотой. Это значительно повышает устойчивость устройства, так как единичные сбои практически не ощущаются. Кроме того, в процессе отработки не только осуществляются управляющие воздействия, но и циклически подтверждаются нахождение уже отработавших степеней в требуемом положении (по сигналам с датчиков). Это также обеспечивает надежную отработку заданной программы.

Возможность осуществления переходов по внутренним условиям позволяет, например, в условиях литейного производства программировать выполнение работ по смазке формы через определенное число циклов основной программы в соответствии с требованиями технологии. По сигналам от внешних устройств можно произвести переход к одному из семи участков программы либо обратиться к подпрограммам. Тем самым можно учесть до семи изменений в ходе протекания технологического процесса.

Система блокировок позволяет исключить аварийные движения манипулятора. На вход узла блокировок поступают сигналы от датчиков крайнего положения звеньев манипулятора и шести датчиков внешнего оборудования, а также сигналы защитного ограждения. С выхода узла снимаются сигналы разрешения на выдачу 12 технологических команд, сигналы разрешения движения вперед или назад для приводов каждой из шести степеней подвижности манипулятора. Введение блокировок в требуемой комбинации обеспечивается запайкой диодов на матрице узла блокировок.

Устройство выполнено на интегральных микросхемах серий К155 и К511, запоминающее устройство — на интегральных полупроводниковых микросхемах серии К519 с электрической сменой информации и сохранением информации при отключении питающих напряжений; бесконтактные выходные усилители реализованы на тиристорах типа ТО-6,3.

Конструктивно устройство выполнено в виде стойки с пультом (см. рис. 5.2). Размеры устройства 350×400×1100 мм.

Как уже ранее упоминалось, благодаря тому, что в цикловых системах управления позиционирование осуществляется с помощью механических упоров, эти системы принципиально отличаются от рассматриваемых ниже позиционных систем более высокой точностью и повышенным быстродействием.

Системы позиционного управления. В позиционных системах управления количество точек позиционирования достигает 1000—2000. В простейших таких системах с небольшим числом точек позиционирования информация о положении, последовательности и времени запоминается отдельно, как и в цикловых системах. Од-



Рис. 5.4. Унифицированное устройство позиционного управления УПМ-772 для промышленных роботов

нако в системах с большим числом точек позиционирования все эти три вида информации объединяются и запоминаются в одном блоке.

В качестве примера рассмотрим серийное унифицированное устройство позиционного управления типа УПМ, внешний вид которого показан на рис. 5.4, а структурная схема — на рис. 5.5. Устройство имеет центральный вычислитель, в котором последовательно обрабатывается вся информация. Обмен информацией между блоками осуществляется через шины *A*, *B* и *C*.

Программы управления размещаются в блоке памяти на магнитной ленте, на которой максимально может содержаться до 2000 кадров программы. Буферное ЗУ полупроводникового типа обеспечивает хранение информации 32 кадров программы.

Микропрограммный автомат формирует управляющие сигналы микроопераций — микрокоманд в соответствии с алгоритмом управления.

Блок управления приводами состоит из унифицированных преобразователей код—напряжение на шесть разрядов. Максимальный

выходной сигнал — 10 В.

Блок измерения преобразует сигналы с датчиков положения звеньев манипулятора в цифровой код и содержит до восьми одинаковых каналов измерения, имеющих общий блок питания датчиков индукционного типа. Разрядность преобразования — 15. Блок обработки технологических команд выдает на технологическое оборудование и манипулятор 15 команд с четырьмя сопроводительными признаками объектов (выход технологических команд релейный) и принимает от оборудования и манипулятора сигналы об отработке команд.

Блок синхронизации вырабатывает последовательности импульсов, синхронизирующих работу устройства, а также частоты, необходимые для работы измерительной системы и формирования выдержек времени.

Пульт управления предназначен для включения устройства, задания режимов работы, организации ручного ввода информации и цифровой индикации информации.

Устройство управления реализовано на интегральных микросхемах серии К155. Наибольшее число управляемых координат равно семи. Программирование осуществляется методом обучения. Пре-

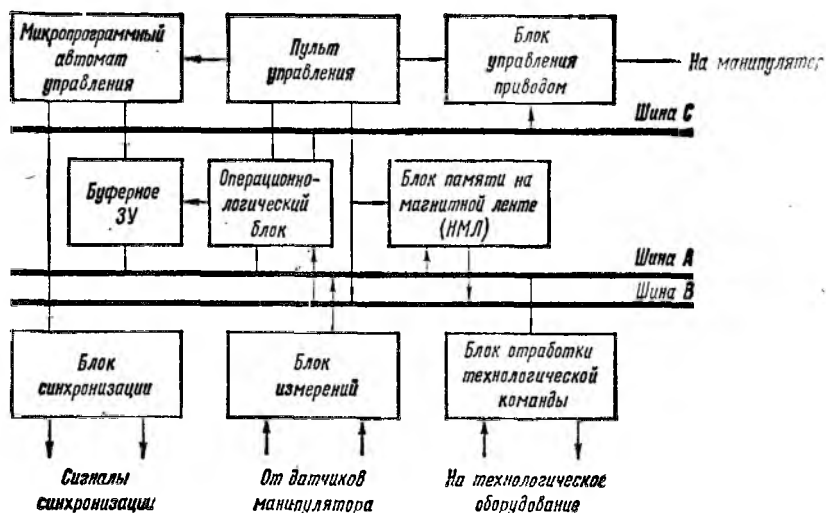


Рис. 5.5. Структурная схема устройства позиционного управления типа УПМ

дусмотрено программирование в кадре программы одновременно для всех координат одной из четырех фиксированных скоростей движения и одной из трех степеней точности. Выбор требуемой программы производится по сигналу от объектов или с пульта управления.

Обмен технологической информацией с манипулятором и внешним оборудованием осуществляется с помощью команд по 19 шинам (15 команд с четырьмя сопровождающими признаками объектов). Прием технологических ответных сигналов ведется по 15 шинам, прием сигналов условий выполнения программы — по 32 шинам, прием запросов выбора программы от объектов управления — по четырем шинам. Число временных выдержек на обработку технологических команд в интервале от 0 до 30 с — до 10.

Выходной сигнал на следящий привод представляет собой напряжение постоянного тока, которое изменяется от $+10$ до -10 В при токе нагрузки 5 мА.

Датчики обратной связи — двухотчетные синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (типа СКТД-6465Д). Дискретность оцифровки по всем координатам одинаковая и составляет 2^{-15} .

Характеристика разгона-торможения привода ступенчатая с числом ступеней торможения не менее семи и с регулировкой ступеней.

Устройство питается от трехфазной сети переменного тока напряжением 360/220 В, потребляемая мощность — до 1,5 кВт.

Конструкция — шкафного типа, связь с манипулятором и технологическим оборудованием — через разъемы, габаритные размеры — $470 \times 650 \times 1700$ мм, масса устройства — 500 кг.

Устройство УПМ имеет несколько модификаций, предназначенных для работы со следящим и шаговым приводами на три, пять и семь степеней подвижности.

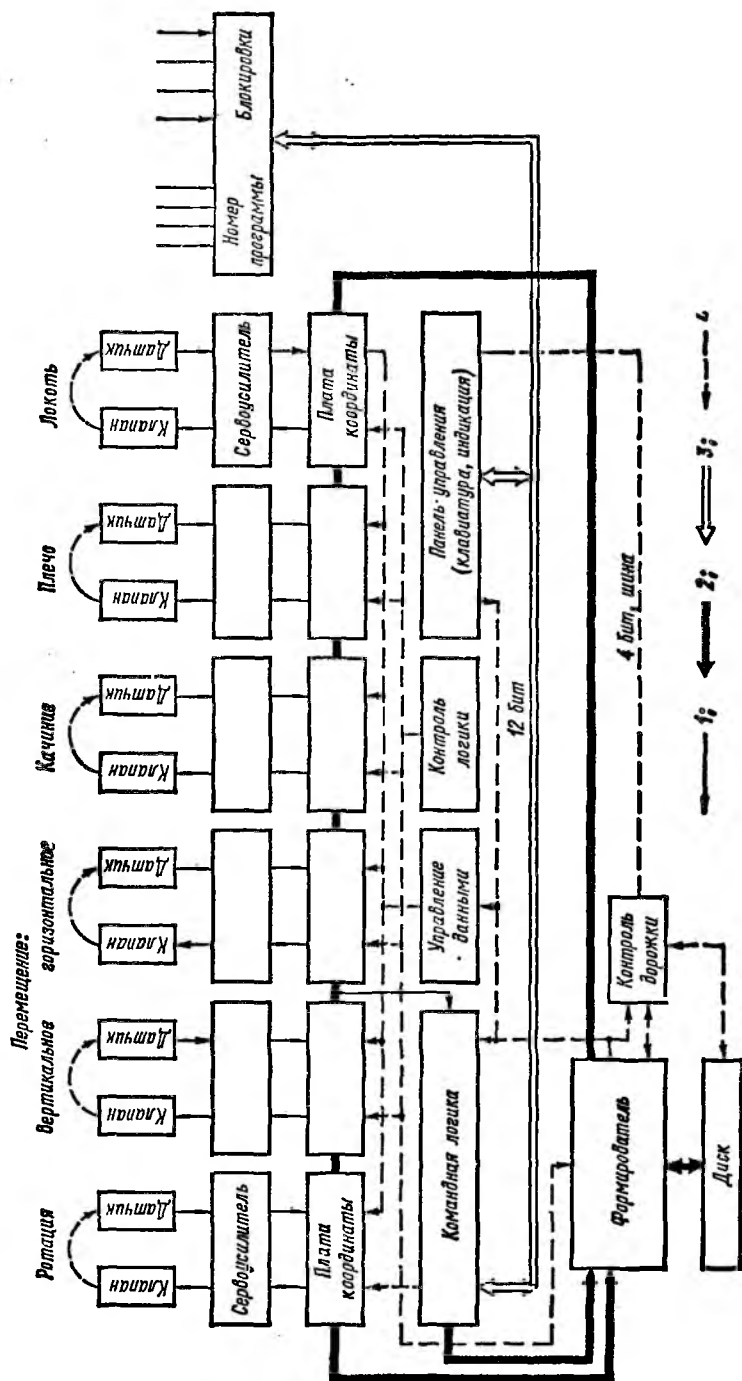


Рис. 5.6. Блок-схема устройства управления промышленного робота «Коат-а-Матик»:

1 — аналоговые сигналы; 2 — программные данные; 3 — шина данных; 4 — сигнал управления

Системы контурного управления. Системы контурного управления, как упоминалось ранее, обеспечивают движение по непрерывным траекториям. Для этого, естественно, необходимо осуществить непрерывное скоординированное управление движением по всем степеням подвижности.

Существуют два способа построения систем контурного управления. Первый из них сводится к комбинации описанного выше позиционного управления и интерполятора, с помощью которого по определенному алгоритму реализуется непрерывная траектория между точками позиционирования. Второй способ основан на непосредственном запоминании требуемой непрерывной траектории для каждой степени подвижности.

Очевидное достоинство первого способа — значительно меньший требуемый объем запоминающего устройства, а второго — большая универсальность и возможность реализации более сложных траекторий.

Устройство контурного управления с интерполятором представляет собой по существу устройство позиционного управления, дополненное специальным вычислительным блоком — интерполятором, который осуществляет расчет отрезков траекторий между точками позиционирования по заданной программе.

На рис. 5.6 показана блок-схема устройства контурного управления, основанного на втором способе. Устройство относится к гидравлическому промышленному роботу «Коат-а-Матик», описанному в параграфе 4.3.

5.2. СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

Робот функционирует, как правило, не изолированно, а совместно с другим оборудованием, в том числе с другими роботами. В связи с этим одной из важных характеристик систем управления роботами является возможность реализации различных вариантов группового управления. Это относится и к управлению несколькими манипуляторами одного робота.

Специфика управления манипуляторами одного робота состоит в наличии пространственных и временных ограничений на движения отдельных манипуляторов, которые конструктивно находятся на одном основании и рабочие зоны которых могут пересекаться.

Простейшим вариантом группового управления является управление несколькими автономно действующими манипуляторами или роботами. В этом случае каждый манипулятор совершает автономные действия, т. е. не связанные в пространстве и во времени с другими манипуляторами. Примером такого управления может служить управление группой роботов, выполняющих операции по обслуживанию не связанных единиц технологического оборудования.

Следующим вариантом группового управления является такое же управление с наложенными временными взаимными связями на движения манипуляторов. В простейших случаях эти связи сводятся к установлению определенной последовательности выполнения каж-

дым манипулятором своей индивидуально заданной операции. К более сложному случаю относится полностью синхронизированная параллельная работа манипуляторов.

Следующим этапом по пути усложнения задачи группового управления является совместное выполнение манипуляторами общей работы, требующей взаимной координации их движений в пространстве общей рабочей зоны (например, сборка одного изделия двумя манипуляторами на одном рабочем месте). Возможны несколько режимов такой совместной работы манипуляторов: квазиавтономное управление, иерархическое подчинение и равноправное взаимодействие.

В квазиавтономном режиме общее задание разбивается на операции, которые выполняют отдельными манипуляторами при учете определенных, наложенных на их движения пространственных и временных ограничений, обеспечивающих взаимную развязку движений манипуляторов.

Режим управления с иерархическим подчинением манипуляторов друг другу заключается в том, что один из манипуляторов является основным, а другие оперативно согласовывают с ним свои движения во времени и пространстве.

К наиболее высокоорганизованному режиму совместной работы манипуляторов относится режим равноправного взаимодействия. В таком режиме при управлении каждым манипулятором в отдельности предполагается оперативный учет движений других манипуляторов.

Совместная работа манипуляторов и роботов может происходить как без ограничений на относительные положения рабочих органов, так и с наложением таких ограничений. Операцией с наложенными ограничениями является, например, совместный перенос двумя манипуляторами одного предмета. Такая операция может потребоваться, когда грузоподъемность одного робота ниже требуемой для переноса объекта или когда переносить приходится крупногабаритные объекты. Кроме того, необходимо обеспечить согласованное во времени и пространстве перемещение рабочих органов роботов при соблюдении определенных силовых и геометрических ограничений на их относительные координаты.

Ограничения на относительные координаты могут быть либо механическими, либо аналитическими в виде задания предельно допустимых отклонений (рассогласований). Примером операции с наложенными механическими ограничениями может служить вставка вала во втулку при условии достаточной прочности изделия. В том случае, если в процессе сопряжения может произойти поломка одного из объектов, необходимо накладывать ограничения заданием допустимых отклонений.

Согласование работы отдельных манипуляторов и роботов возможно при следующих вариантах организации управления: централизованное управление группой роботов от одного устройства управления;

децентрализованное групповое управление, когда индивидуальные системы управления роботов перекрестно связаны друг с другом;

комбинированное управление, являющееся объединением двух первых вариантов.

Все эти варианты могут быть реализованы программно. При централизованном управлении в функции общего устройства управления входит согласование работы индивидуальных устройств управления для организации требуемого взаимодействия отдельных роботов друг с другом и с совместно работающим другим оборудованием. При выходе из строя такого центрального устройства будет нарушена работа всех роботов.

Децентрализованное управление, реализованное на индивидуальных устройствах управления, свободно от данного недостатка, так как отказ одного из этих устройств или линии связи между ними вызовет отказ в работе только одного робота или некоторой их части. Однако в этом случае сложнее изменять алгоритм взаимодействия роботов, поскольку необходимо изменять структуру имеющихся связей между отдельными устройствами управления.

Наиболее гибкой и надежной является комбинированная система управления, включающая взаимосвязанные центральное и местные устройства управления.

5.3. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотренные выше системы программного управления роботами основаны на наиболее простом способе автоматического управления без обратной связи по фактическому состоянию внешней среды, с которой взаимодействует робот. В связи с этим такие системы применимы только при полностью детерминированных и неизменных на протяжении всего процесса управления внешних условиях работы, а также целях управления и параметрах самого робота.

Адаптивное управление осуществляется в функции от параметров внешней среды и поэтому позволяет обеспечить достижение цели управления при непостоянстве или же неполной априорной информации об этих параметрах. Примерами простейших задач, которые могут быть выполнены при адаптивном управлении, являются взятие произвольно расположенных или подвижных предметов путем самонаведения на них захватного устройства манипулятора, выбор и взятие предметов из ряда других по определенным признакам (форма, цвет и т. д.), обход неподвижных препятствий и т. п.

Для осуществления такого управления робот должен быть снабжен сенсорными устройствами, которые были рассмотрены в параграфе 3.6.

При адаптивном управлении, разумеется, максимально используются также и заранее составленные программы для выполнения тех частей задания, которые могут быть реализованы этим простым способом. Таким образом, в общем случае в системах адаптивного управления используются оба способа управления — по заранее составленным программам и в функции от текущей информации о внешней среде.

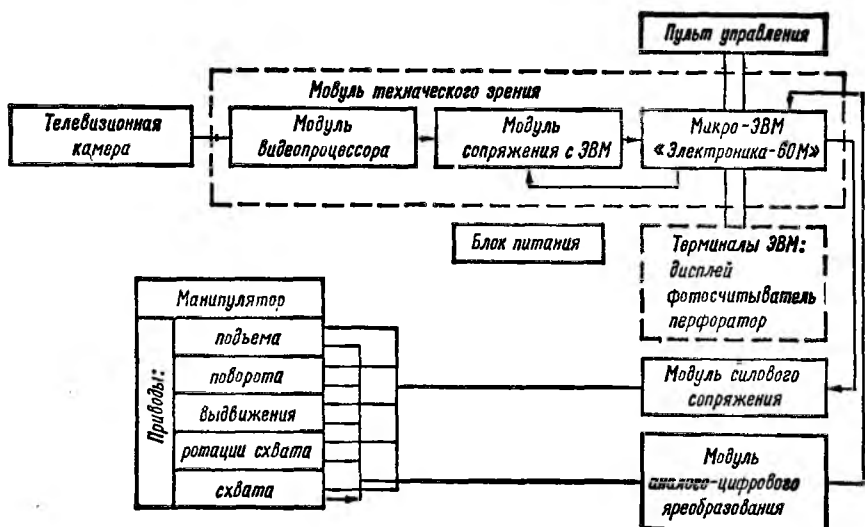


Рис. 5.7. Структурная схема робота МП-8 с техническим зрением

Примером системы адаптивного управления роботом является система управления промышленным роботом для дуговой сварки. Сам процесс сварки ведется по программе, однако перед этим автоматически осуществляется поиск места стыка свариваемых деталей, а затем движение вдоль стыка при определенных ориентации и расстоянии электрода относительно стыка. Эти задачи реализуются с помощью различного типа датчиков расстояния и угла наклона (например, индуктивных и контактных), которые размещены на сварочной головке манипулятора.

Другим примером робота с адаптивным управлением является окрасочный робот с простейшим устройством технического зрения в виде линейки фотоэлементов, которая служит для определения контура очередного окрашиваемого изделия.

В параграфе 3.6 описана система технического зрения промышленного робота МП-8. На рис. 5.7 приведена структурная схема этого робота. Манипулятор робота модульной конструкции с пятью степенями подвижности и цилиндрической системой координат имеет грузоподъемность 15 кг. Управление его приводами осуществляется через пневмоклапаны. Позиционирование обеспечивается методом противодавления с использованием пневматических тормозов оригинальной конструкции.

Управление приводами производится через модуль силового сопряжения от микро-ЭВМ «Электроника-60М», входящей в состав модуля технического зрения (МТЗ). Микро-ЭВМ реализует заданные динамические и статические характеристики робота, осуществляя решение задач управления и технического зрения в режиме разделения времени. Информация с датчиков обратной связи поступает в ЭВМ через модуль многоканального двенадцатиразрядного анало-

го-цифрового преобразователя. Робот МП-8 универсальный. Его типовыми применениями являются сборка, контроль качества и сортировка продукции по внешнему виду, обслуживание технологического оборудования, требующее работы с произвольно расположенными объектами.

Обобщенная структурная схема системы управления оучувствленным роботом. Системы адаптивного управления имеют иерархическую структуру. На рис. 5.8 показана обобщенная структура такой системы, которая включает пять уровней управления (УУ1—УУ5).

Связь человека-оператора с роботом осуществляется через пульт, в состав которого могут входить как стандартные терминалы ЭВМ, так и специализированные устройства общения. Оператор выдает роботу задания, контролирует их выполнение и проводит общий контроль за процессом функционирования робота в целом.

Пятый (верхний) уровень автоматического управления УУ5 анализирует задания, поступающие от человека-оператора, и определяет последовательность действий робота в соответствии с заданием, т. е. планирует деятельность робота. На этом уровне анализируется информация о внешней среде, получаемая от средств сбора информации, и синтезируются модели внешней среды, на базе которых выполняется планирование действия робота. В общем случае модели внешней среды образуют иерархическую последовательность от первичной, наиболее конкретной модели, которая описывается с помощью параметров среды, непосредственно определяемых сенсорными устройствами, а далее до все более абстрактных моделей, использующих соответственно более обобщенные понятия для описания внешней среды (например, словесное описание на естественном языке, получаемое от человека-оператора). В процессе функционирования модели внешней среды корректируются и совершенствуются.

Пятый уровень управления отвечает за функционирование робота как единой системы, обеспечивая реализацию не только основных,

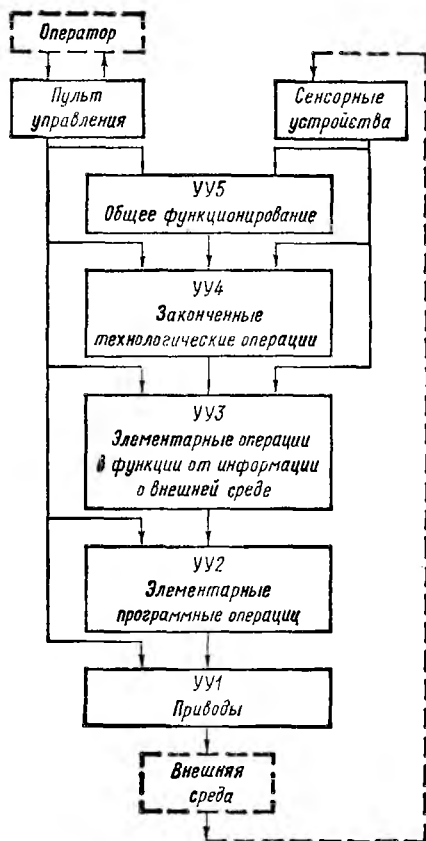


Рис. 5.8. Обобщенная структура системы управления оучувствленным роботом

«профессиональных» целей, которые стоят перед роботом, но и служебных общесистемных задач, которые определяются требованиями к условиям функционирования робота (обеспечение надежности, включая защиту от внешних воздействий и внутренних неполадок, условий безопасности и т. д.). В целом уровень УУ5 определяет интеллектуальные возможности робота и круг решаемых им задач.

Четвертый уровень управления УУ4 — это уровень синтеза функционально законченных сложных действий, в результате которых достигается конкретная конечная цель, например сборка какого-либо изделия. В соответствии с планом, выработанным на вышестоящем уровне УУ5, на уровне УУ4 производится его разбиение на последовательность элементарных типовых операций, которые реализуются нижними уровнями управления. Так, например, план сборки изделия состоит из последовательности элементарных действий по взятию, ориентированию, соединению и закреплению деталей в узлы, а также из настроечных, контрольно-измерительных и прочих операций. Результатом действия уровня УУ4 является выдача управлений на последующие уровни УУ3, УУ2, а в отдельных случаях — и на уровень УУ1. На уровне УУ4 используется текущая информация от сенсорных устройств для оперативной коррекции планов, получаемых с уровня УУ5.

Третий и второй уровни управления УУ3 и УУ2 — это уровни синтеза элементарных операций, на которые могут быть разбиты законченные действия робота. Различие между этими уровнями заключается в том, что на уровне УУ3 синтезируются управления в функции от информации о внешней среде, а на уровне УУ2 — более простые управления по жесткой программе. В связи с этим при синтезе управлений на уровне УУ3 используются наряду с типовыми программами уровня УУ2 команды на вход уровня УУ1 параллельно с управляющими воздействиями с выхода уровня УУ2. В результате поступившее на вход третьего уровня задание реализуется, во-первых, в виде последовательности типовых программ второго уровня, которые в случае необходимости оперативно корректируются с уровня УУ3 в соответствии с изменениями внешней среды, и, во-вторых, в виде совокупности управляющих воздействий непосредственно на отдельные приводы уровня УУ1. Все эти действия в целом задаются и координируются уровнем УУ3 в зависимости от текущей информации о внешней среде и состоянии самого робота. Здесь происходит и необходимая первичная обработка информации, получаемой с соответствующих сенсорных устройств робота.

На уровне УУ2 рассчитываются управляющие воздействия, которые затем поступают на уровень УУ1, реализующий программное управление приводами.

Нижний уровень управления УУ1 реализует управление по отдельным степеням подвижности робота и представляет собой систему управления приводами, каждый из которых состоит из исполнительного двигателя и устройства управления. От характе-

Результаты данного уровня управления зависят прежде всего динамические и точностные характеристики робота.

Структурная схема системы управления роботом, изображенная на рис. 5.8, является упрощенной. На ней не показаны прямые и обратные связи выходов отдельных уровней управления с входами нижних уровней, кроме ближайшего, а также обратные связи выходов нижних уровней с входами верхних (в том числе информация о завершении отдельных программ, об аварийных ситуациях и т. п.). На схеме не отражены информационные связи отдельных уровней с пультом управления, которые обеспечивают передачу информации о процессе функционирования робота человеку-оператору.

Человек-оператор принципиально может взаимодействовать с роботом на любом уровне иерархии управления. В зависимости от того, на каком уровне происходит это взаимодействие, можно выделять пять режимов такого управления роботом: три копирующих режима (взаимодействие с уровнями УУ1, УУ2, УУ3) и два супервизорных режима управления (взаимодействие с уровнями УУ4 и УУ5). В каждом режиме общение осуществляется по соответствующему каналу связи.

Человек-оператор может выдавать задания роботу непосредственно на уровень УУ1 с помощью кнопочного управления каждым приводом отдельно. Такое управление является весьма трудоемким и требует большого навыка. Временное запаздывание в канале связи (например, при управлении космическим манипулятором) еще более усложняет работу в этом режиме. В связи с этим к нему прибегают только в тех случаях, когда по каким-либо причинам другие способы управления оказываются неприемлемыми.

При выдаче задания человеком роботу на уровень УУ2 обычно используются задающий манипулятор либо рукоятки, с помощью которых задается вектор скорости движения рабочего органа робота в пространстве декартовых координат. Этот вектор по отдельным степеням подвижности распределяется данным уровнем управления автоматически. Описанные два режима взаимодействия человека с роботом возможны только при качественной визуальной обратной связи и достаточно простой внешней среде.

Наиболее сложным копирующим режимом управления является взаимодействие человека-оператора с роботом на третьем уровне управления. Это взаимодействие происходит уже в режиме двустороннего активного обмена информацией между человеком-оператором и системой управления. В качестве задающего органа при таком взаимодействии также могут быть использованы задающие рукоятки или манипуляторы. Однако исполнительные манипуляторы в данном случае оцувствлены, и на пульт связи с оператором поступает информация о текущем состоянии робота и об отдельных характеристиках внешней среды. Таким образом, человек-оператор уже не только имеет возможность работать по видеоизображению среды, но и использовать другую информацию для управления роботом. Кроме того, в этом случае удастся автоматически исключить опасность возникновения некоторых аварийных ситуаций в результате, напри-

мер, перегрузки манипулятора, столкновения с препятствием и т. п.

Режимом управления, при котором человек-оператор взаимодействует со следующим, более высоким уровнем управления — уровнем УУ4, является супервизорный режим управления. В этом случае человек-оператор выдает роботу задания в виде директив, которые описывают процесс функционирования робота на каком-либо проблемно ориентированном языке низкого ранга. Взаимодействие человека-оператора с роботом на этом уровне может иметь форму диалога, т. е. происходить в так называемом интерактивном режиме, когда после получения задания и его анализа система управления в свою очередь запрашивает человека-оператора о необходимой дополнительной информации для выполнения задания (например, координаты тех или иных предметов, видимых на экране системы телевизионного целеуказания, и т. п.). Робот может обращаться также к человеку-оператору за инструкцией уже в ходе выполнения задания в аварийных и других непредвиденных ситуациях.

Наиболее сложным для реализации системой управления, но зато наиболее простым для человека-оператора является супервизорный режим управления при взаимодействии оператора с уровнем УУ5. В этом случае задания выдаются системе управления роботом в самом общем виде (например, на ограниченном естественном языке), и далее оператор лишь контролирует поведение робота, вмешиваясь в работу системы управления только по ее запросу или в аварийных ситуациях по своему усмотрению. Таким образом, здесь также реализуется интерактивный режим взаимодействия человека с роботом.

Возможность осуществления перечисленных выше различных режимов автоматизированного управления роботом со стороны человека-оператора позволяет ему полностью использовать все свои интеллектуальные и физические способности для обеспечения выполнения роботом поручаемых заданий.

Описанная обобщенная структура системы управления роботом может быть аппаратно реализована на одной или нескольких ЭВМ. Отдельные ее уровни могут быть выполнены в виде специализированных устройств управления, в свою очередь управляемых от ЭВМ. Подобным образом может быть, в частности, организовано управление группой роботов, у которых периферийные устройства управления управляются специализированными устройствами, а координация их работы осуществляется центральной управляющей ЭВМ. При этом на местах целесообразно реализовать три нижних уровня управления, а остальные — в центральной ЭВМ.

Такая организация управления группой роботов позволяет максимально автономизировать каждый робот и значительно снизить поток заявок на обслуживание в центральную ЭВМ. Однако в то же время это может привести к значительному усложнению системы управления в целом. В связи с этим оптимальное распределение функций между центральным и периферийными устройствами управления имеет большое значение, в том числе и в отношении надежности и стоимости системы управления роботом.

Алгоритмы адаптивного управления. Рассмотрим алгоритмы, которые реализуются отдельными уровнями управления, показанными на рис. 5.8. На рис. 5.9 представлена структура задач, решаемых на каждом из уровней иерархии системы управления УУ2—УУ5. Задача первого уровня УУ1 сводится к традиционной задаче автоматического управления с учетом особенностей конструкции робота. Алгоритмы решения задач этого уровня в настоящее время достаточно хорошо разработаны и аппаратно реализуются обычно в виде специализированных устройств управления отдельными приводами.

В функции уровня УУ2 входят вычисление управляющих воздействий для совместного управления приводами, пересчет координат цели из трехмерного пространства, в котором задается перемещение робота, в пространство собственных характеристических координат робота, определяемых системой координат, в которой работает его манипулятор, а также формирование траектории движения робота в трехмерном пространстве.

Траектория движения робота в пространстве может задаваться в табличном либо аналитическом виде. Кроме того, отдельные точки, в которые необходимо выводить рабочий орган манипулятора, могут задаваться в виде вектора характеристических координат. В этом случае отпадает необходимость в пересчете координат. Однако такое задание траектории движения неудобно для человека и требует большого объема памяти для хранения всей последовательности точек.

На уровне УУ3, который реализует простейшую адаптацию темы управления к изменениям условий функционирования при выполнении элементарных типовых операций, могут использоваться различные подходы. Наиболее простым является эвристический подход, сущность которого состоит в том, что, исходя из анализа выполняемой операции и возможных ситуаций изменения условий функционирования, для каждой комбинации показаний сенсорных устройств строится соответствующая эвристическая программа коррекции действий робота. Однако такой подход эффективен только при небольшом числе средств очувствления. Другой подход основан на введении штрафных функций в итеративные алгоритмы расчета координат робота по вектору цели. Такой подход является более универсальным, однако для его реализации в реальном времени требуется ЭВМ достаточно большой мощности.

Рассмотрим в качестве примера задачи уровня УУ3 операцию взятия произвольно расположенной детали. Для выполнения этой операции необходимо произвести следующие действия: 1) определить координаты геометрического центра детали и ее ориентацию в пространстве; 2) рассчитать траекторию движения схвата к детали в трехмерном пространстве; 3) пересчитать траекторию движения из декартовых координат в систему характеристических координат робота; 4) отработать рассчитанную траекторию; 5) произвести взятие детали; 6) рассчитать траекторию движения схвата манипулятора с деталью в заданное место; 7) пересчитать последнюю траекторию в систему характеристических координат робота; 8) отработать эту рассчитанную траекторию.

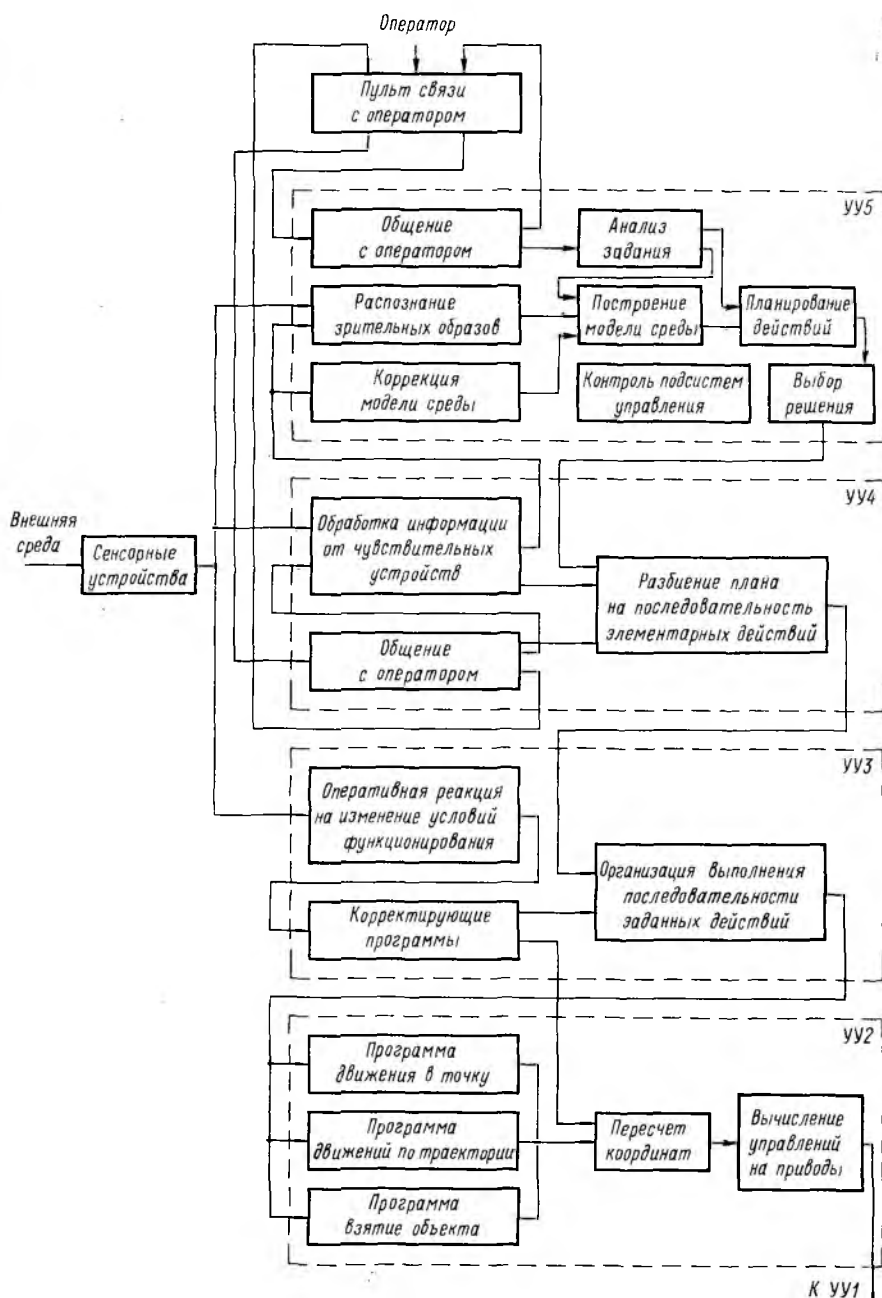


Рис. 5.8. Структура задач, решаемых на различных уровнях управления роботом

Для установления координат деталей и их ориентации можно использовать различные технические средства, рассмотренные в параграфе 3.6. Например, при транспортировке деталей с помощью конвейера с целью автоматического определения координат деталей можно применять линейку с фотодатчиками, установленную над лентой конвейера. При наличии на обозреваемом поле нескольких деталей необходимо произвести их идентификацию.

Для взятия детали, ориентация и координаты которой уже определены, следует вывести схват робота к детали. При отсутствии ограничений наиболее быстрым является перемещение схвата по прямой, соединяющей исходное и требуемое положения схвата, с равномерным изменением его ориентации.

Процесс взятия детали при использовании информации о наличии предмета в схвате заключается в следующем. После вывода схвата над деталью робот открывает схват и опускает его до тех пор, пока не сработает датчик наличия детали в схвате. По его сигналу робот закрывает схват. Далее производится расчет траектории переноса детали в заданную точку рабочей зоны. Структурная схема алгоритма взятия произвольным образом ориентированных деталей и их переноса изображена на рис. 5.10.

Как на втором, так и на третьем уровнях управления реализуются алгоритмы выполнения элементарных типовых операций. Именно поэтому значительную часть операций третьего уровня можно осуществлять путем непосредственного воздействия на вход уровня УУ1, минуя уровень УУ2. В связи с этим при классификации уровней иерархии управления не по типу алгоритмов, а по типу реализуемых технологических операций оба эти уровня можно объединить в один — уровень синтеза элементарных типовых операций.

На четвертом уровне решаются вопросы синтеза функционально законченных действий, а также ведется предварительная обработка информации, получаемой от сенсорных устройств. Алгоритмы данного уровня реализуют разложение задания на элементарные типовые операции третьего и второго уровней управления. Для этого используются методы доказательства теорем, эвристического программиро-

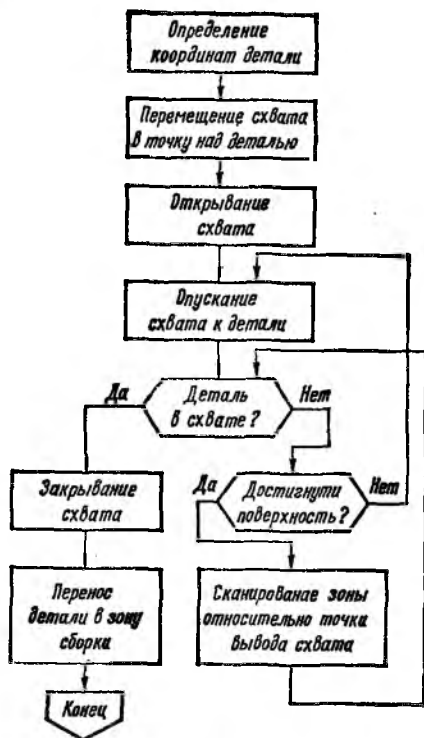


Рис. 5.10. Структурная схема алгоритма взятия произвольно расположенного предмета

вания, лингвистические методы и т. п. Кроме того, алгоритмы этого уровня обеспечивают диалог системы управления с человеком-оператором на проблемно ориентированном языке и выполнение заданных инструкций (директив) в реальном масштабе времени. Информация от сенсорных устройств используется для коррекции планов осуществления операций при изменении каких-либо условий функционирования. При недостаточном объеме информации для выполнения полученного задания робот обращается к человеку-оператору. Отдельные алгоритмы данного уровня могут быть отнесены к элементам искусственного интеллекта.

Алгоритмы пятого уровня управления реализуют, как уже упоминалось ранее, наиболее общие задачи управления роботом. На этом уровне общение человека-оператора с роботом осуществляется на ограниченном естественном языке в диалоговом режиме. Кроме того, на данном уровне имеются также алгоритмы распознавания для речевого управления роботом. Алгоритмы пятого уровня управления определяют степень сложности задач, которые может решать робот автономно, без участия человека-оператора. На этом уровне синтезируются и корректируются модели внешней среды разной степени абстракции. Построение модели среды заключается в распознавании образов, например, по телевизионному изображению, в формировании самой модели за счет установления взаимосвязей между объектами внешней среды и в последующей ее корректировке и совершенствовании по информации от других сенсорных устройств. Кроме того, может использоваться словесное описание среды, получаемое от человека-оператора. В соответствии с заданием и построенной моделью среды алгоритмы данного уровня обеспечивают планирование действий робота, включая выбор конкретного плана из многих возможных. Здесь могут быть применены методы поиска решений на графе, методы доказательства теорем и т. п. С целью обеспечения нормального функционирования для всех систем робота на этом уровне осуществляется централизованный контроль различных подсистем робота в виде программных тестов и т. п. В случае обнаружения сбоев или неполадок производится либо обращение к человеку-оператору, либо самоподстройка или саморемонт неисправной подсистемы в зависимости от имеющихся в распоряжении системы управления средств [11].

Программное обеспечение оцувствленных роботов. В системах управления оцувствленными роботами программное обеспечение играет тем бóльшую роль, чем развитее система сенсорных устройств и, соответственно, сложнее решаемые с их помощью задачи адаптации к условиям внешней среды. Рассмотрим основные требования, которым должна удовлетворять система программного обеспечения (СПО) таких роботов.

При рассмотрении этих требований будем исходить прежде всего из необходимости обеспечения функционирования робота в недетерминированной среде. Это означает, что робот должен оперативно воспринимать изменения внешней среды и в соответствии с этим менять тактику выполнения задания.

Следующим важным требованием, предъявляемым к СПО, является обеспечение гибкости и многоплановости управления роботом в том смысле, что структура системы должна давать возможность осуществлять широкий круг самых разнообразных действий робота, выполняемых в произвольной последовательности.

Управление роботом должно осуществляться в реальном масштабе времени. Это накладывает определенные требования на быстродействие СПО, которая не должна ограничивать скорость выполнения роботом заданной операции. При этом СПО должна оперативно обеспечивать реакцию на различные непредвиденные изменения внешней или внутренней среды. Это требование находит свое отражение в структуре как СПО, так и аппаратного обеспечения робота.

Включение ЭВМ в состав системы управления расширяет возможности робота, однако при этом возрастает стоимость такой системы управления. В связи с этим даже из чисто экономических соображений к СПО предъявляется требование по обеспечению возможности управления несколькими роботами от одной ЭВМ. Быстродействие и структура современных ЭВМ позволяют осуществить такой режим работы. Для его реализации необходимо соответствующим образом организовать структуру программного обеспечения управляющей ЭВМ. Такой режим будет соответствовать режиму работы ЭВМ с разделением времени, при котором в качестве пользователей выступают отдельные роботы и другое технологическое оборудование.

Помимо управления роботами в основном рабочем режиме СПО должна обеспечивать реализацию процесса программирования роботов, которое осуществляется на одном из входных языков системы человек-робот.

Процесс программирования робота включает две стадии: задание программы функционирования робота и отладка заданной программы. На обеих стадиях необходимо обеспечить общение человека с роботом, что также возлагается на СПО. При этом важно организовать общение таким образом, чтобы по возможности не приходилось бы предъявлять существенных дополнительных требований к уровню подготовки оператора.

Система программного обеспечения должна обладать гибкой структурой, позволяющей осуществлять модификации базовой системы, т. е. расширять или сужать ее по мере необходимости.

Большое число требований, предъявляемых к СПО, и многофункциональный характер самого объекта управления вызывают необходимость в учете самых различных факторов при создании таких систем. Естественным путем решения этой задачи является системный подход, при котором робот рассматривается как единая комплексная система, состоящая из ряда взаимодействующих подсистем. Связать воедино все эти подсистемы и подчинить их функционирование выполнению заданной операции — такова главная задача, возлагаемая на СПО.

Систему программного обеспечения робота, как и любую другую СПО, можно разделить на две основные части: прикладное программное обеспечение и системное программное обеспечение. Приклад-

ное программное обеспечение предназначено для реализации алгоритмов управления роботом и его отдельными подсистемами, а системное программное обеспечение — для организации вычислительных процессов в управляющей ЭВМ.

Следуя принципам нисходящего проектирования программ, системное программное обеспечение можно разделить далее на две части: диспетчер системы и служебные программы. Диспетчер системы представляет собой совокупность программ, отвечающих за управление функционированием СПО. К служебным программам относятся программы, обеспечивающие контроль работоспособности системы, обращение к библиотеке стандартных подпрограмм, к устройствам внешней памяти и т. п.

Прикладное программное обеспечение можно разделить на три группы программ, реализующих алгоритмы взаимодействия с основными подсистемами робота: 1) программы обработки сенсорной информации, 2) программы управления исполнительными устройствами, 3) программы связи с человеком-оператором.

Программы обработки сенсорной информации обеспечивают взаимодействие СПО с сенсорной системой робота. По внешним информационным каналам этот блок программ получает сенсорную информацию, обрабатывает ее и передает в программы управления исполнительными устройствами и в программы связи с оператором для формирования контрольных сообщений.

Программы управления исполнительными устройствами связывают СПО с исполнительными устройствами робота. Управляющие воздействия вычисляются в соответствии с инструкциями человека-оператора, поступающими через программы связи с оператором, и на основе данных, получаемых от сенсорных устройств робота. На блок программ связи с оператором выдается контрольная информация для оператора от остальных программ.

Программы связи с оператором обеспечивают ввод и трансляцию программ на входном проблемно ориентированном языке, обработку оперативных инструкций оператора и выдачу человеку-оператору сообщений от различных программ СПО. Эта группа программ осуществляет диалоговый режим работы человека-оператора с роботом.

Обобщенная схема взаимодействия основных подсистем робота и элементов системы программного обеспечения управляющей ЭВМ приведена на рис. 5.11. Входная и выходная информация СПО включает цифровые данные, аналоговые данные и инициативные сигналы. Инициативные сигналы — это информация в виде одиночных импульсов, поступающая на систему прерываний ЭВМ или выдаваемая из ЭВМ на смежное оборудование. К входной информации СПО относится информация, поступающая в ЭВМ с пульта оператора и от сенсорных устройств робота.

Перечень внешних информационных связей робота может изменяться весьма существенно в зависимости от типа конкретного робота, управляемого с помощью данной СПО. У роботов со слабо развитой сенсорной и простейшей системой связи с оператором

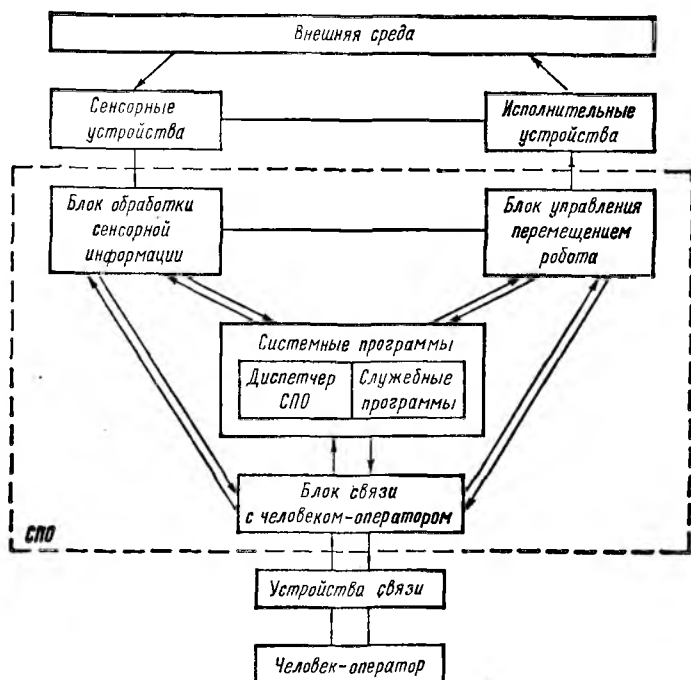


Рис. 5.11. Обобщенная схема взаимодействия основных подсистем робота

число внешних информационных каналов невелико. С усложнением аппаратного обеспечения роботов соответственно усложняется и программное обеспечение управляющей ЭВМ и увеличивается число информационных каналов, которыми ЭВМ связана с роботом и человеком-оператором.

Система программного обеспечения строится так, чтобы основные группы программ могли работать одновременно. В то время когда программы управления исполнительными устройствами осуществляют расчет и выдачу управляющих воздействий, программы обработки сенсорной информации принимают и перерабатывают данные с сенсорных устройств о текущем состоянии робота и внешней среды, а программы связи с оператором в диалоговом режиме сообщают ему информацию о ходе выполнения заданной операции и в случае необходимости получают от него оперативные инструкции.

Таким образом, в ЭВМ, управляющей действиями робота, реализуется многопрограммный режим работы, при котором подсистемы робота выступают в роли отдельных пользователей ЭВМ. При этом СПО системы управления робота строится в виде совокупности взаимодействующих программных модулей. Для того чтобы полностью использовать все преимущества модульного программирования, необходимо иметь модули не слишком большого объема. В связи с этим программные модули, реализующие сложные логиче-

ские функции в алгоритмической системе, в свою очередь следует разбивать на отдельные модули. В результате возникает иерархическая структура СПО.

В качестве примера рассмотрим СПО робота «Барс», которая используется, в частности, для управления интегральным роботом ЛПИ-3 (см. параграф 5.4). Ее функциональная схема показана на рис. 5.12.

В состав этой СПО входит группа программ управления исполнительными устройствами, которая включает следующие основные программные модули: 1) модуль вычисления управляющих воздействий (управлений) для манипулятора, в котором осуществляется преобразование координат точек, заданных в декартовом пространстве или в пространстве характеристических координат манипулятора, в управляющие воздействия, подаваемые на приводы манипулятора; 2) модуль управления приводами, выдающий рассчитанные управляющие воздействия на приводы манипулятора; 3) модуль блокировки системы, обеспечивающий экстренное торможение манипулятора по требованию человека-оператора или при срабатывании аварийных датчиков на работе.

Следующая группа программ осуществляет обработку сенсорной информации и включает два модуля: 1) модуль опроса измерителей положения, служащий для приема и преобразования информации о текущем положении робота в пространстве; 2) модуль опроса устройств очувствления, преобразующий информацию о состоянии внешней среды, поступающую от устройств очувствления робота.

Группа программ связи с оператором реализует функции транслятора с входного языка систем, в качестве которого используется разработанный в ЦНИИ РТК проблемно ориентированный язык РОКОЛ [11], и состоит из четырех программных модулей: 1) модуль ввода операторов принимает и анализирует информацию с пульта оператора, поступающую на языке РОКОЛ; 2) модуль расшифровки директив осуществляет трансляцию введенных программ функционирования робота с языка РОКОЛ в машинный формат; 3) модуль построения траекторий обеспечивает реализацию заданной оператором программы функционирования робота и работает в режиме интерпретации операторов языка РОКОЛ; 4) модуль печатания сообщений служит для вывода информации на пульт оператора.

Диспетчер системы «Барс» состоит из трех модулей: 1) модуль обработки прерываний осуществляет анализ и классификацию поступающих с внешнего оборудования сигналов прерывания; 2) модуль выбора программ обеспечивает распределение процессорного времени между программными модулями СПО; 3) модуль работы с таймером осуществляет привязку управления роботом к реальному времени.

Наконец, имеется группа служебных модулей, которая включает три программных модуля: 1) модуль обращения к стандартным подпрограммам служит для организации работы программных модулей СПО с библиотекой стандартных подпрограмм; 2) модуль связи с устройствами внешней памяти; 3) модуль контроля системы кон-

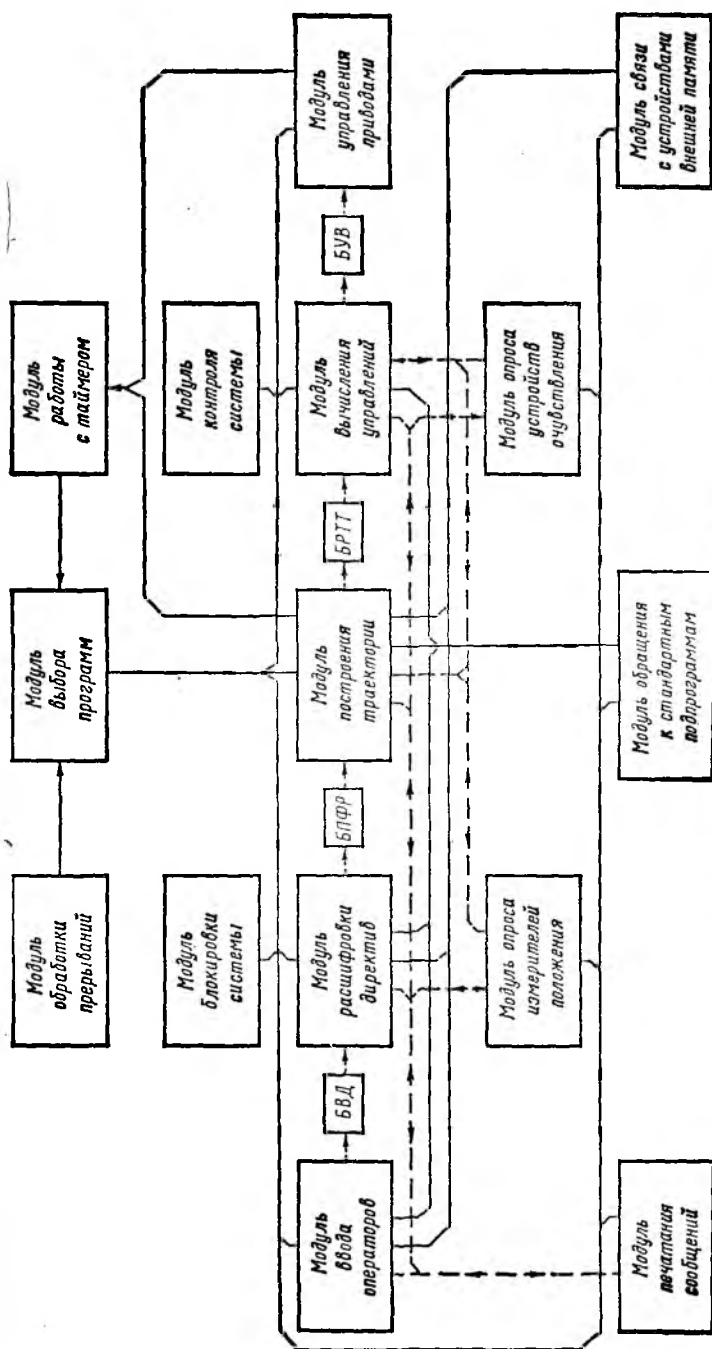


Рис. 5.12. Функциональная схема системы программного обеспечения роботов «Барс»:

— передача управления и данных; — — — передача данных; БДД, БПП, БУВ — буферы ввода директив, программ функционирования робота, расчетных точек траектории, управляющих воздействий

тролирует работоспособность СПО в процессе ее функционирования.

Рассмотрим организацию обмена данными между программными модулями. На схеме, представленной на рис. 5.12, пунктирными линиями показана передача данных между модулями, а сплошными — передача как данных, так и управлений. Стрелки на линиях указывают направление передачи, а их отсутствие свидетельствует о двустороннем обмене между модулями.

В системе возможны два варианта организации передачи информации между программными модулями. В первом варианте один модуль (информирующий) может постоянно передавать другому (информируемому) данные независимо от результатов обработки информируемым модулем предыдущей группы данных. Группа данных, формируемая за время цикла работы информирующего модуля и необходимая для работы информируемого модуля, называется записью. В случае, если время цикла работы информирующего модуля меньше времени цикла работы информируемого модуля, целесообразно использовать буферный массив, который может накапливать несколько записей, обеспечивая бесперебойную работу информируемого модуля.

В системе «Барс» организовано несколько таких буферных массивов, основные из которых показаны на рис. 5.12. Наиболее рациональной организацией буферных массивов является их построение по циклическому принципу. При этом после считывания очередной записи из буферного массива информируемым модулем остальные записи не сдвигаются, чтобы заполнить место считанной информации. Для согласования работы информирующего и информируемого модулей с буферным массивом в каждом буфере имеется заголовок, который содержит адреса записи и чтения из буфера, размер свободной зоны в буферном массиве и количество записей в нем.

Второй вариант обмена информацией между модулями системы «Барс» — это двусторонний обмен, носящий запросный характер. Другими словами, один модуль не может продолжить свою работу до тех пор, пока другой модуль не предоставит ему необходимую информацию. А тот модуль в свою очередь не может непрерывно выдавать эту информацию, так как сначала ожидает данных о ее характере. В этом случае оба модуля поочередно являются модулями информирующего и информируемого типа, а буферный массив, связывающий эти модули, всегда содержит только одну запись. Буферный массив такого рода называют полем связи.

Модульная структура системы «Барс» позволяет легко ее модифицировать, приспособляя к конкретной конфигурации технических средств управляемой робототехнической системы. Например, при создании системы группового управления роботами в системе «Барс» увеличивается число модулей управления приводами. Если в системе функционируют однотипные роботы, то в составе СПО достаточно иметь только один модуль вычисления управлений. При использовании роботов различных типов число таких модулей должно быть равно числу типов роботов.

Число модулей опроса измерителей положения и устройств очу-
вления аналогично определяется числом типов этих устройств
у роботов.

В системе «Барс», как и в любой системе, работающей в режиме
разделения времени, невозможно заранее предвидеть момент вре-
мени, когда появится необходимость активизации того или иного
модуля. Это определяется такими случайными факторами, как мо-
мент ввода команды человеком-оператором, момент срабатывания
одного из датчиков робота и т. п. Все эти причины вызывают преры-
вание в ЭВМ и выдачу заявки на активизацию определенного модуля
СПО. Так как одновременно могут быть поданы заявки на активи-
зацию нескольких модулей, модуль выбора программ, планирующий
работу системы «Барс», должен передать управление наиболее важ-
ному в данный момент времени модулю. Это достигается за счет вве-
дения системы приоритетов. Каждому модулю системы «Барс» при-
сваивается приоритет в соответствии с важностью выполняемой им
функции и необходимостью быстрой реакции в ответ на заявку на
активизацию данного модуля. Из всех программных модулей, пре-
тендующих на процессорное время, управление передается тому,
который имеет наивысший приоритет.

Поскольку заявка на обслуживание, поступившая, например,
от аварийного датчика, не может ждать окончания обслуживания
текущей заявки, в системе «Барс» реализована дисциплина абсолют-
ных приоритетов с дообслуживанием.

С целью выбора наиболее приоритетного модуля из числа претен-
дующих на процессорное время и передачи ему управления исполь-
зуют управляющие массивы: управляющие шкалы, управляющие
слова и информационные поля модулей. Для фиксации модулей,
претендующих на процессорное время, служат управляющие шкалы.
Управляющие шкалы могут быть двух типов: в шкале типа 1 фикси-
руется необходимость передачи управления модулем СПО, в шкале
типа 2 — запрет на передачу управления.

Для обеспечения функционирования системы «Барс» введена
таблица, состоящая из трех шкал: шкалы заданий, шкалы невыпол-
ненных заданий и шкалы выжидания. Каждая шкала занимает
одно слово в таблице шкал. Длина этого слова зависит от числа про-
граммных модулей, включенных в систему. Модулю, имеющему
приоритетный номер K , соответствует K -й разряд в каждой из шкал.
Если в K -м разряде какой-либо шкалы стоит единица, то это
означает, что модуль с номером K претендует на процессорное
время (открыт) по данной шкале. Управление передается модулю
с наивысшим приоритетом из числа модулей, открытых во всех
шкалах.

Шкала заданий (ШЗ) относится к типу 1. Единица в K -м разряде
ШЗ означает, что модуль с номером K может начать свое функциони-
рование, так как для него подготовлена соответствующая информа-
ция (задание).

Шкала невыполненных заданий (ШНЗ) относится к типу 2. Она
обеспечивает защиту от переполнения буферных массивов.

Шкала выжиданий (ШВ) также относится к типу 2. В ШВ заносится информация об ожидании программными модулями системы «Барс» ответов от запрошенных ими модулей.

Просмотр таблицы шкал и передачу управления наиболее приоритетному модулю, открытому во всех трех шкалах, осуществляет модуль выбора программ (МВП). Обращение к МВП происходит всякий раз, когда изменяется содержимое хотя бы одной из управляющих шкал. Все операции со шкалами производятся при блокированных прерываниях, чтобы избежать сбоев в работе системы.

Каждый модуль, которому присвоен приоритет, имеет управляющее слово (УС). Это УС содержит номер модуля и адрес его информационного поля. Таким образом, каждое УС занимает две ячейки в оперативной памяти ЭВМ. Для ускорения поиска нужного УС массив управляющих слов организован в виде таблицы с прямым доступом. Ключом при обращении к этой таблице служит приоритетный номер модуля, которому передается управление.

Кроме управляющих слов модулей введено главное управляющее слово (ГУС), расположенное в двух фиксированных ячейках оперативной памяти. Такое ГУС содержит либо нулевой код, если в данный момент выполняется модуль выбора программ, либо УС модуля, который осуществляется в данный момент. Если в решении находится модуль обработки прерывания или модуль работы с таймером, то ГУС содержит УС прерванного модуля. Засылку информации в ГУС производит только модуль выбора программ при блокированных прерываниях.

Каждый модуль, у которого есть УС, имеет свое информационное поле (ИПМ), содержащее информацию, необходимую для возобновления функционирования данного модуля после прерывания. Кроме того, ИПМ включает информацию, требуемую для настройки модуля в исходное состояние.

После выбора с помощью управляющих шкал наиболее приоритетного модуля, претендующего на процессорное время, модуль выбора программ по его управляющему слову определяет адрес соответствующего ИПМ. После восстановления содержимого регистров ЭВМ в соответствии с данными, хранящимися в ИПМ выбранного модуля, модуль выбора программ передает управление на его текущий вход.

5.4. СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Интеллектуальное управление — это следующий после адаптивного управления наивысший в отношении алгоритмических возможностей тип управления. Робототехника является одной из областей применения такого управления, которое в теории управления в настоящее время находится еще в стадии становления на пути дальнейшего развития идей адаптивного управления.

В теории адаптивного управления в результате развития подхода от простого к более сложному и исходя из стремления обеспечить автоматическое управление в условиях все большей неопределенности

и изменчивости объекта управления и внешней среды сперва был разработан раздел самонастраивающихся систем управления (с автоматической настройкой параметров при неизменной структуре системы), а затем — раздел самоорганизующихся систем управления (с автоматическим изменением структуры системы). В рамках самоорганизующихся систем развивалась теория самообучающихся систем управления, посвященная наиболее совершенной форме управления в современной теории управления, которую можно рассматривать как первый шаг к интеллектуальному управлению, поскольку в ее основе лежат идеи принятия решений, формирования целей управления и планирования поведения. Как было указано в гл. 2 при рассмотрении управления движением в живых организмах, эти идеи являются обязательными компонентами интеллектуальной деятельности.

Описанная в предыдущем параграфе обобщенная пятиуровневая система управления оцувствленным роботом по существу повторяет структуру системы управления движением человека (см. рис. 2.3). Как было показано выше, верхний, пятый, уровень этих систем определяет алгоритмические возможности системы в целом, ее интеллектуальный потенциал.

Под интеллектом (см. параграф 2.4) понимается общая, в основном врожденная познавательная способность, включая умение обрабатывать информацию о внешней среде с построением ее моделей и использовать эту информацию для планирования поведения в условиях заведомой неполноты информации и непредсказуемо изменяющейся внешней обстановки.

В соответствии с этим под искусственным интеллектом, реализуемым с помощью вычислительных машин, понимается класс систем программного обеспечения для решения указанных выше творческих неформализуемых задач. К типичным таким задачам относятся, например, игровые (шахматы, нарды, домино и т. п.) и другие подобные задачи (где невозможен полный перебор вариантов), доказательство теорем, переводы с одного языка на другой. Фундаментальной проблемой искусственного интеллекта является создание модели человеческого мозга и разгадка процесса его мышления.

Принципиальное различие интеллекта искусственного и естественного заключается в том, что первый имитирует естественный интеллект только в части решения определенного типа творческих задач, в то время как естественный интеллект значительно универсальнее и многограннее и включает прежде всего такие аспекты, как социальную обусловленность, мотивацию и эмоциональность.

В создании искусственного интеллекта можно выделить два принципиально различных подхода. Первый подход заключается в разработке общего теоретического решения проблемы на основе адекватного математического аппарата. Работы в этом направлении ведутся, в частности, с использованием лингвистического подхода, теории нечетких множеств и бионического подхода применительно к имитации интеллектуальных функций биологических систем [24].

Второй подход близок к эволюционному пути развития естественного интеллекта и заключается в постепенном накоплении частных эвристических находок для решения отдельных конкретных практических задач. Сумма таких частных решений даст по мере их накопления постепенное повышение интеллектуального уровня СПО, а затем откроет качественно новые возможности прежде всего в результате создания системы самоусовершенствующегося искусственного интеллекта.

В области робототехники на сегодня наиболее перспективным представляется не поиск универсальных решений, а именно последовательное решение конкретных задач с максимальным использованием всей возможной априорной информации и с экономически обоснованной степенью общности этих решений, включая как программное, так и аппаратное обеспечение.

На этом пути к настоящему времени разработаны (в различных модификациях) описанная выше многоуровневая система управления оцувствленными роботами и соответствующие СПО, включая решение отдельных задач идентификации и распознавания объектов внешней среды, оптимизации алгоритмов управления движениями и т. д. Хотя выше было указано, что искусственный интеллект — это проблема программного обеспечения, однако для ее решения требуется создать и соответствующее аппаратное обеспечение. Дело в том, что быстроедействие современных ЭВМ на много порядков недостаточно для решения таких интеллектуальных задач, которые способен успешно решить человек. Как было показано в гл. 2, объясняется это тем, что в ЭВМ информация обрабатывается последовательно, а в нервной системе — параллельно многими структурами мозга. Попытки создать для реализации искусственного интеллекта сети, аналогичные нейронным, из моделей нейронов (так называемых формальных нейронов) тоже не принесли успеха [24]. Хотя информация в них обрабатывается параллельно, но детерминированно на основе формальной логики, в то время как в нейронных сетях обработка информации носит вероятностно-статистический характер, как и сама их структура. Создание элементной базы, аналогичной существующей в живой природе, — это один из возможных путей аппаратного обеспечения задач искусственного интеллекта.

В чисто научном плане, как упоминалось во введении, результатом развития идей создания искусственного интеллекта роботов явится принципиально новое техническое устройство этого типа, которое, обладая двусторонним активным взаимодействием с внешней средой, получит на определенном этапе своего развития способность к самоусовершенствованию и вступит в эволюционный процесс, темпы которого будут заведомо намного выше, чем естественной эволюции живой природы, приведшей к созданию человека. Процесс этот не будет иметь предела, в том числе и в виде способностей человека.

В связи с тем, что искусственный интеллект находится еще в начальной стадии своего развития, в настоящее время актуальным направлением в решении этой проблемы является создание и приме-

нение гибридного интеллекта в виде интерактивной системы человек — ЭВМ. Применительно к робототехнике этому соответствует структурная схема управления оцувствленным роботом, в которой человек-оператор образует верхний уровень управления роботом, эпизодически дополняя его алгоритмические возможности своим интеллектом.

Как было уже указано, на сегодня роботы с интеллектуальным управлением, т. е. с искусственным интеллектом, еще не созданы, хотя существуют роботы с адаптивным управлением, которые имеют некоторые элементы искусственного интеллекта. К таким роботам относится упомянутый в гл. 1 экспериментальный исследовательский робот СРИ («Шейки») (см. рис. 1.9) Станфордского научно-исследовательского института (США). Робот представляет собой тележку на колесах с электроприводом. На ней расположены поворачивающаяся платформа с системой технического зрения, выполненной на базе телевизионной камеры типа видикона, и с оптическим дальномером, управляющая ЭВМ и радиотехнический передатчик, который связывает управляющую ЭВМ робота с центральной ЭВМ, осуществляющей интеллектуальное управление роботом. СПО последней на основе информации от сенсорных устройств осуществляет распознавание объектов внешней среды и формирует ее общую модель. Затем на следующем уровне управления на основе этой модели вырабатывается подробный план действий, включая маршрут движения тележки в незнакомой обстановке. Этот план далее разбивается на элементарные операции, команды на выполнение которых передаются по радиоканалу на исполнительные устройства тележки. В ходе выполнения команд центральная ЭВМ осуществляет оценку качества работы по поступающей сенсорной информации с тем, чтобы совершенствовать как модель внешней среды, так и алгоритмы управления роботом в сходных ситуациях в будущем.

Типичный пример решаемой роботом задачи — войти в комнату, поменять местами лежащие на полу определенные предметы несложной формы. Робот должен для этого найти нужную дверь, войти в комнату, не натываясь на стены и предметы, находящиеся в ней, распознать подлежащие перемещению предметы по их форме среди других предметов, подойти к ним с правильной стороны и передвинуть в нужные места.

Исполнительное устройство робота максимально упрощено: он не имеет даже манипуляторов, а перемещает предметы путем их толкания. Основное внимание здесь уделено программному обеспечению.

Примером отечественного исследовательского робота, предназначенного для изучения проблем интеллектуального управления, может служить интегральный робот ЛПИ-3, который является развитием упомянутого в гл. 1 робота ЛПИ-2 ЦНИИ РТК (см. рис. 1.14). Этот робот представляет собой универсальную физическую модель оцувствленного робота, которая предназначена для исследования отработки:

алгоритмов различных уровней управления, включая искусственный интеллект, обработку сенсорной информации, адаптивное управление движением;

принципов взаимодействия робота с оператором (включая ввод заданий, супервизорное управление, копирующий режим), с другими роботами и оборудованием, в комплексе с которым может работать робот;

отдельных частей робота (исполнительных устройств, средств сенсорного комплекса и общения оператора с роботом).

Робот состоит из двух электромеханических манипуляторов, передающей ТВ-камеры системы технического зрения, задающего манипулятора, речевого командного устройства и осязательного стола. Манипулятор имеет семь степеней подвижности, электрические приводы и набор съемных схватов. Схваты оснащены несколькими десятками тактильных датчиков, датчиков усилий и датчиков ближней локации.

Система управления роботом построена на ЭВМ СМ-4. В комплекс средств общения человека-оператора с роботом наряду со стандартным оборудованием (телетайп, перфоратор и т. д.) входят оптические ультразвуковые координаторы, осязательный стол с фотодиодными информационными линейками, система целеуказания по экрану телевизора, специальный пульт управления с задающим манипулятором, устройство речевого управления. (Система программного обеспечения робота ЛПИ-3 «Барс» описана в параграфе 3.3.)

Опыт работы с такими экспериментальными интегральными роботами показывает, что их использование как универсальной физической модели робота является весьма эффективным, а в отдельных случаях и единственно возможным средством разработки перспективных типов осязательных роботов. Это обусловлено сложностью и новизной алгоритмических проблем, включая проблемы искусственного интеллекта, и комплексным характером объекта разработки. Даже для сравнительно простых роботов такая физическая модель является весьма эффективным средством отработки их отдельных компонентов и программного обеспечения.

Для дальнейшего расширения возможностей таких универсальных моделей роботов, учитывая сложность и громоздкость аналитических методов исследования и описания подобного рода машин, большой интерес представляют разработка и включение в СПО таких моделей алгоритмов самообучения и самоорганизации как средства автоматизированного синтеза роботов и прежде всего их систем управления.

ГЛАВА 6

ДИНАМИКА РОБОТОВ

6.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ

В этой главе рассмотрены вопросы исследования процессов управления движением роботов, включая установившиеся (статические и динамические) и переходные процессы, в том числе вопросы точности, устойчивости и качества процессов. Эти исследования, как известно, могут иметь одну из двух целей: анализ или синтез. В обоих случаях они включают следующие основные этапы: математическое описание, выбор критериев оценки, собственно аналитическое исследование движений и, наконец, натурный эксперимент.

Вследствие сложности математического описания манипуляторов как объекта управления и тем более процессов управления ими в составе роботов в качестве основного метода таких исследований используют математическое моделирование на ЭВМ. На последних этапах исследования оно часто дополняется физическим моделированием и завершается, как выше сказано, натурным или полунатурным экспериментом.

Прежде чем перейти к математическому рассмотрению вопроса, сформулируем некоторые общие принципы построения манипуляционных систем роботов и управления ими с позиций оптимизации их динамических свойств.

1. Свободные движения манипуляторов должны быть максимально согласованы с вынужденными. (Принцип соответствия свободных и вынужденных движений.)

Иными словами, суть этого принципа заключается в том, что механическую часть и приводы манипулятора следует выбирать исходя из типовых движений, которые должен совершать манипулятор, чтобы эти 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 системе координат.

2. Управляемое движение в общем случае должно содержать две фазы — грубую и точную. (Принцип последовательного разделения движений.)

Как было указано в гл. 2, в движениях человека четко различаются две составляющие: быстрое, но не точное «баллистическое» движение и медленное, более точное и осмысленное движение в завершающей фазе.

Такое разделение является компромиссным решением подобных терминальных задач с противоречивыми требованиями по скорости и точности движения. Аналогичным образом необходимо строить и движения манипуляторов роботов: на разных этапах движения оперировать разными критериями качества и соответственно получать разные способы реализации движений, включая использование разных способов управления, степеней подвижности, типов приводов и даже манипуляторов.

3. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально согласованы исходя из требований к общему движению манипулятора. (Принцип параллельного разделения движений.)

Требуемые движения рабочего органа манипулятора реализуются как совокупность его составляющих по отдельным степеням подвижности. Соответственно этому требования, предъявляемые к результирующему движению (по точности, быстродействию, грузоподъемности и т. д.), должны быть оптимально распределены между этими составляющими, которые реализуются с помощью определенных приводов и кинематических схем исходя из критериев оптимальности, относящихся к манипулятору в целом (в том числе с учетом его массы, энергопотребления, стоимости, надежности и т. д.).

Например, целесообразно выбирать кинематику манипулятора таким образом, чтобы к степеням подвижности, которые определяют грузоподъемность всего манипулятора, требования по качеству управления были наиболее облегченными (в позиционном роботе привод подъема делать цикловыми и т. п.) и, наоборот, чтобы были максимально разгружены приводы, обеспечивающие заданную точность позиционирования. Аналогично следует подходить к разделению требования по быстродействию и т. д.

4. Различные способы управления движением должны применяться в оптимальном сочетании и при максимальном использовании априорной информации исходя из общих требований к заданному движению манипулятора. (Принцип оптимального сочетания способов управления.)

В управлении манипулятором, включая как общие уровни управления, так и управление приводами отдельных степеней подвижности, должны обоснованно сочетаться различные виды управления — программное, адаптивное, интеллектуальное и ручное. Иными словами, это управление как для отдельных составляющих движения по отдельным степеням подвижности, так и по фазам во времени в общем случае должно быть комбинированным. При этом в основе выбора такой комбинации способов управления, как и в предыдущем случае, должна лежать оптимизация по общесистемным критериям качества. Из этого следует, что для упрощения задачи управления, во-первых, необходимо максимально использовать априорную информацию как о внешней среде, так и собственно о роботе. Для этого, в частности, надо стремиться максимально детерминировать внешнюю среду, при необходимости, например, осуществлять распознавание ее объектов, прибегая к их маркировке и т. д. (см. ниже п. 8). Во-вторых, необходимо по возможности снизить требования к ка-

честву управления путем применения, в частности, автоматической компенсации влияния основных возмущающих факторов (нестабильность параметров питания, параметров внешней среды и т. д.).

5. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально распределены во времени. (Принцип оптимальной последовательности 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 быстроедействие перемещения рабочего органа манипулятора, а во втором — при последовательном включении степеней подвижности — могут быть максимально упрощены управление и система приводов (вплоть до использования всего одного привода). В каждом конкретном случае существует определенная оптимальная последовательность движений по отдельным степеням подвижности.

6. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально взаимосвязаны. (Принцип связанного управления.)

Движения, одновременно совершаемые по отдельным степеням подвижности, могут быть несвязанными, а могут и взаимно влиять друг на друга из-за кинематических связей, через общий источник питания или через общие приводы. Часто для упрощения задач управления манипулятором стремятся убрать эти взаимные влияния путем, в частности, введения специальных перекрестных компенсационных связей по управлению отдельными степенями подвижности или соответствующего усложнения кинематической схемы манипулятора. Однако хотя такое автономное управление, действительно, проще, оно отнюдь не обеспечивает заведомо наилучшего качества управления движением манипулятора в целом. Поэтому для каждого конкретного манипулятора и, более того, для различных типов движения одного и того же манипулятора существует оптимальный алгоритм связанного управления всеми приводами манипулятора, который должен быть определен и по возможности реализован.

Примерами типовых алгоритмов такого связанного управления являются упомянутое в гл. 2 управление по принципу ведущего звена и параллельное централизованное управление всеми приводами, рассчитанное с учетом их возможных взаимных влияний и дополненное системой коррекции отклонений движений относительно заданных из центра.

7. Управление движением в общем случае должно быть многоуровневым. (Принцип иерархического управления.)

Речь идет о необходимости оптимизации разделения задачи управления манипулятором (включая обработку сенсорной информации) на несколько уровней управления (см. параграф 5.3). При этом для разных задач это распределение и общее число используемых уровней будут различными: от прямого управления с верхнего уровня отдельными приводами до использования в основном ранее отработанных типовых жестких программ, комбинируемых с верхних уровней.

8. Требования к движениям робота должны быть дополнены требованиями к работающему совместно с ним другому оборудованию, а также и к объектам манипулирования. (Принцип взаимного согласования робота и совместно работающего оборудования.)

При формулировании требований к движениям робота при его работе с другим оборудованием необходимо учитывать, что эти требования могут быть существенно облегчены за счет часто несущественных изменений конструкции и режима работы этого оборудования.

То же распространяется на конструкцию изделий, 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.

6.2. ОСНОВНЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ¹

Исследование манипуляторов обычно начинается с их кинематики [12]. Механическая система манипулятора состоит из звеньев, обычно цилиндрической формы, на которые наложены голономные склерономные связи. В первом приближении все звенья могут приниматься абсолютно твердыми. Соседние звенья манипулятора образуют кинематические пары, т. е. такие соединения двух соприкасающихся звеньев, которые допускают их относительное движение. В манипуляторах, как правило, применяются низшие кинематические пары 5-го класса, т. е. пары, обладающие одной степенью подвижности, которая обеспечивает возможность поступательного либо углового перемещения относительно оси кинематической пары [29, 30].

Механическая система манипулятора в целом представляет собой разомкнутую многозвенную кинематическую цепь с закрепленным основанием. В типовом случае, когда манипулятор состоит только из низших пар 5-го класса, число степеней подвижности манипулятора равно числу кинематических пар. Это число определяет число переменных, которые необходимо знать, чтобы однозначно определить положение (конфигурацию) манипулятора. Эти переменные будем называть обобщенными координатами q_i , $i = 1, \dots, n$. На рис. 6.1 приведен пример кинематической цепи шестизвенного манипулятора.

При исследовании движений манипуляторов необходимо знать положение различных точек его звеньев в обычном трехмерном евклидовом пространстве R^3 . При этом особый интерес представляет положение его рабочего органа. Для получения соотношений, связывающих декартовы координаты произвольной точки манипулятора в системе координат неподвижного основания с его обобщенными

¹ Этот и последующие параграфы гл. 6 написаны совместно с В. П. Макарычевым.

координатами, удобно связать с каждым звеном манипулятора специально подобранную ортогональную систему координат.

Перенумеруем звенья цифрами $0, 1, \dots, n$, начиная с основания, которое считаем 0-м, фиктивным, звеном. При своем номер $i = 1, \dots, n$ кинематической пары, образованной $i-1$ -м и i -м звеньями. Свяжем с каждым i -м звеном манипулятора ортогональную систему координат $Ox_{i1}x_{i2}x_{i3}$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Через x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} обозначим координаты некоторой точки в i -й системе координат. При этом для 0-й системы индекс 0 будем иногда опускать, так что $x = (x_1, x_2, x_3)^* \equiv (x_{01}, x_{02}, x_{03})^*$ — радиус-вектор этой точки в системе координат, связанной с основанием. (Здесь и далее знак * означает транспонирование.)

Выберем i -ю систему координат следующим образом [30]: ось x_{i3} направим вдоль оси данной ($i+1$ -й) кинематической пары, ось x_{i1} — вдоль общего перпендикуляра к осям $x_{i-1,3}$ и x_{i3} , а ось x_{i2} направим так, чтобы система координат была правой. Для последней системы координат ее начало O_n поместим в геометрический центр рабочего органа, ось $x_{n,3}$ направим параллельно оси $x_{n-1,3}$, а две другие оси можно направить произвольно, но только так, чтобы система координат была правой (рис. 6.2).

При таком выборе систем координат звеньев $i-1$ -ю систему координат можно перевести в i -ю с помощью поворота, двух переносов и еще одного поворота, выполняемых системой координат в следующем порядке:

поворот на угол γ_i вокруг оси $x_{i-1,3}$ такой, чтобы оси $x_{i-1,1}$ и x_{i1} стали параллельными;

перенос на величину s_i вдоль оси $x_{i-1,3}$ такой, чтобы оси $x_{i-1,1}$ и x_{i1} оказались на одной прямой;

перенос на величину a_i вдоль оси x_{i1} такой, чтобы совпали начала $i-1$ -й и i -й систем координат;

поворот на угол α_i относительно оси x_{i1} такой, чтобы системы координат $i-1$ и i совместились.

В качестве обобщенной координаты q_i , $i = 1, \dots, n$, манипулятора берут для вращательной степени подвижности угол γ_i , а для посту-

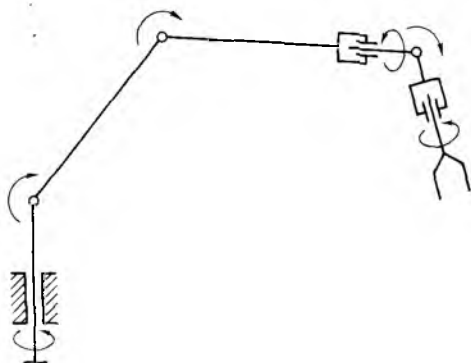


Рис. 6.1. Кинематическая цепь шестизвеного манипулятора

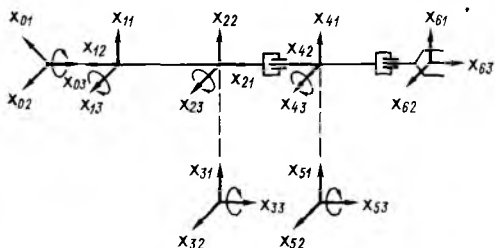


Рис. 6.2. Выбор систем координат

пательной — s_i . Параметры же a_i, α_i всегда постоянны и зависят от конструкции.

Указанное преобразование координат позволяет получить декартовы координаты некоторой точки манипулятора в связанной с основанием (нулевой) системе координат путем серии последовательных переходов от i -й системы координат к $i-1$ -й.

Принятый в робототехнике компактный способ задания преобразования координат из одной системы в другую состоит в использовании так называемых однородных координат, когда за координаты трехмерного вектора $s = (s_1, s_2, s_3)^* \in R^3$ принимается любая четверка чисел $r = (r_1, r_2, r_3, r_4)^*$, связанная с s пропорцией $r_1 : r_2 : r_3 : r_4 = s_1 : s_2 : s_3 : 1$ [22] (все такие четверки эквивалентны). В однородных координатах матрица A_i , осуществляющая преобразование координат из i -й системы в $i-1$ -ю систему, будет иметь вид

$$A_i = \begin{bmatrix} U_i & b_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i \cos \alpha_i & \sin \gamma_i \sin \alpha_i & a_i \cos \gamma_i \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i \cos \alpha_i & -\cos \gamma_i \sin \alpha_i & a_i \sin \gamma_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

где U_i — ортогональная матрица 3×3 ; b_i — трехмерный вектор; U_i соответствует вращательной, а b_i поступательной составляющей движения.

В силу своего специального вида матрица A_i обладает следующими полезными свойствами:

$$A_i^{-1} = \begin{bmatrix} U_i^* & -U_i^* b_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6.2)$$

$$\partial A_i / \partial q_i = D_i A_i, \quad (6.3)$$

где

$$D_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{если степень подвижности вращательная,} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{если степень подвижности поступательная.} \end{cases} \quad (6.4)$$

Пусть $r_i = (x_i, 1)^* = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, 1)^*$ — радиус-вектор некоторой фиксированной точки в пространстве в i -й системе координат манипулятора, $i = 0, 1, \dots, n$. Тогда

$$r_{i-1} = A_i r_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6.5)$$

$$r_0 = A_1 A_2 \dots A_i r_i = B_i r_i, \quad (6.6)$$

где $B_i = A_1 A_2 \dots A_i$, $i = 1, \dots, n$.

Введем здесь же используемые в дальнейшем матрицы

$$B_i^j = \frac{\partial B_i}{\partial q_j}, \quad B_i^{jk} = \frac{\partial B_i^j}{\partial q_k}, \quad i, j, k = 1, \dots, n. \quad (6.7)$$

Из свойства (6.3) матриц A_i следует, что

$$B_i^j = \begin{cases} A_1 \dots A_{j-1} D_j A_j \dots A_i, & \text{если } j < i, \\ 0, & \text{если } j > i; \end{cases}$$

$$B_i^{jk} = \begin{cases} A_1 \dots A_{j-1} D_j A_j \dots A_{k-1} D_k A_k \dots A_i, & \text{если } j < k < i, \\ A_1 \dots A_{j-1} D_j^2 A_j \dots A_i, & \text{если } j = k < i, \\ 0, & \text{если } \max(j, k) > i, \end{cases} \quad (6.8)$$

где матрицы D_j определены формулой (6.4).

Соотношение (6.6) устанавливает зависимость между обобщенными координатами манипулятора и декартовыми координатами произвольной его точки, в частности центра рабочего органа. Если оси последней (n -й) системы координат $O_n x_{n1} x_{n2} x_{n3}$ трактовать как векторы, задающие ориентацию рабочего органа, и обозначить $f = x_{n3}$, $g = x_{n1}$, $p = \vec{O_n O_n}$ (радиус-вектор центра рабочего органа), то матрица B_n в силу своей структуры дает значения этих векторов (в системе координат, связанной с основанием манипулятора):

$$B_n = \begin{bmatrix} g_1 & (f \times g)_1 & f_1 & p_1 \\ g_2 & (f \times g)_2 & f_2 & p_2 \\ g_3 & (f \times g)_3 & f_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Поскольку векторы f , g , $f \times g$ единичные и взаимно ортогональные, из девяти их компонентов существенными являются только три. Если в качестве последних выбрать f_1 , f_2 , g_1 и обозначить $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, f_1, f_2, g_1)^*$, то для векторов p , $\bar{p}$ положения, положения и ориентации рабочего органа соответственно будут иметь место равенства

$$p = F(q), \quad (6.10)$$

$$\bar{p} = \bar{F}(q), \quad (6.11)$$

где

$$F(q) = (\theta_1^* B_n(q) \theta_4, \theta_2^* B_n(q) \theta_4, \theta_3^* B_n(q) \theta_4)^*,$$

$$\bar{F}(q) = (F(q)^*, \theta_1^* B_n(q) \theta_3, \theta_2^* B_n(q) \theta_3, \theta_1^* B_n(q) \theta_1)^*,$$

$$\theta_1 = (1, 0, 0, 0)^*, \quad \theta_2 = (0, 1, 0, 0)^*, \quad \theta_3 = (0, 0, 1, 0)^*,$$

$$\theta_4 = (0, 0, 0, 1)^*. \quad (6.12)$$

В тех случаях, когда требуется рассчитать лишь малые приращения в положении и ориентации рабочего органа при малых изменениях обобщенных координат, удобно пользоваться не самими урав-

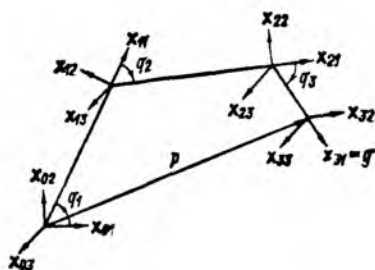


Рис. 6.3. Кинематическая схема трехзвенника

нениями (6.10), (6.11), а их продифференцированными аналогами и соответствующими разностными уравнениями:

$$\dot{\tilde{p}} = \frac{\partial \tilde{F}}{\partial q} \dot{q} \left(\Delta \tilde{p} = \frac{\partial \tilde{F}}{\partial q} \Delta q \right); \quad (6.13)$$

$$\dot{p} = \frac{\partial F}{\partial q} \dot{q} \left(\Delta p = \frac{\partial F}{\partial q} \Delta q \right). \quad (6.14)$$

Эти же соотношения оказываются полезными при решении обратной задачи: определении обобщенных координат манипулятора по заданным значениям положения и ориентации его рабочего органа. Аналитическое решение этой задачи для манипулятора общего вида весьма затруднительно, так как связано с решением системы шести нелинейных уравнений (6.11) с n неизвестными. Эта задача успешно решается только для конкретных кинематических схем манипуляторов с небольшим числом степеней подвижности. При этом для шести-звенных манипуляторов задача имеет в общем случае конечное число решений. Использование же соотношения (6.13) позволяет ограничиться системой линейных уравнений, однозначное решение которой в случае невырожденности матрицы $\partial \tilde{F} / \partial q$ имеет вид

$$\Delta q = (\partial \tilde{F} / \partial q)^{-1} \Delta \tilde{p}. \quad (6.15)$$

Пример. Рассмотрим плоский трехзвенник, изображенный на рис. 6.3, для которого векторы параметров и матрицы преобразования систем координат [см. формулы (6.1), (6.6)] будут равны:

$$s = (s_1, s_2, s_3) = (0, 0, 0), \quad \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0, 0, \pi/2), \quad a = (a_1, a_2, a_3) = (l_1, l_2, l_3);$$

$$A_l = \begin{bmatrix} \cos q_l & -\sin q_l & 0 & l_l \cos q_l \\ \sin q_l & \cos q_l & 0 & l_l \sin q_l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad l = 1, 2, 3;$$

$$B_1 = A_1;$$

$$B_2 = A_1 A_2 =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_3 = A_1 A_2 A_3 =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_1+q_2+q_3) - \sin(q_1+q_2+q_3) & 0 & l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1+q_2) + l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) \\ \sin(q_1+q_2+q_3) \cos(q_1+q_2+q_3) & 0 & l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1+q_2) + l_3 \sin(q_1+q_2+q_3) \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Оператор перехода от обобщенных координат к декартовым

$$F(q) = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1+q_2) + l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) \\ l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1+q_2) + l_3 \sin(q_1+q_2+q_3) \\ 0 \end{bmatrix},$$

а матрица частных производных

$$\frac{\partial F}{\partial q} =$$

$$= \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1+q_2) - & -l_2 \sin(q_1+q_2) - & -l_3 \sin(q_1+q_2+q_3) \\ -l_3 \sin(q_1+q_2+q_3) & -l_3 \sin(q_1+q_2+q_3) & \\ \hline l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1+q_2) + & l_2 \cos(q_1+q_2) + & l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) \\ + l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) & + l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) & \\ \hline 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Так как трехзвеной плоский, для задания положения и ориентации рабочего органа достаточно трех величин p_1, p_2, g_1 , которые определяют обобщенные координаты по формулам (возможны две конфигурации)

$$q_1 \approx \arctg \frac{s_1}{s_2} \pm \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + |s|^2}{2l_1|s|},$$

$$q_2 = \pm \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 - |s|^2}{2l_1 l_2},$$

$$q_3 = \arctg(g_1) - q_1 - q_2,$$

где $s = p - l_3 g$.

6.3. СИНТЕЗ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ ВО ВРЕМЕНИ

Задача синтеза траекторий движения манипуляторов состоит в том, чтобы по заданному перемещению рабочего органа манипулятора в рабочей зоне определить, как следует изменять во времени обобщенные координаты, чтобы осуществить это перемещение. Иными словами, требуется построить вектор-функцию обобщенных координат $q(t)$, где t — время, которое обеспечивает требуемое перемещение рабочего органа манипулятора. Задача допускает различные постановки в зависимости от того, в каком виде задано требуемое перемещение и какие ограничения налагаются на манипулятор в процессе движения. В зависимости от конкретной задачи перемещение рабочего органа может быть задано либо только начальным и конечным состояниями, либо геометрической фигурой, либо временной функцией. При этом может быть задано как положение

ние рабочего органа, так и его ориентация. Среди ограничений можно выделить два вида: 1) конструктивные ограничения на обобщенные координаты, скорости и ускорения; 2) требование отсутствия столкновений звеньев манипулятора с внешними препятствиями и друг с другом.

Рассмотрим случай, когда задано во времени перемещение рабочего органа манипулятора $p(t)$, $t \in [t_0, t_T]$. Тогда вектор-функция $q(t)$, $t \in [t_0, t_T]$ должна во всяком случае удовлетворять уравнению (6.10). Если на движения наложены дополнительные условия, то $q(t)$ иногда может определяться единственным образом. Так, если манипулятор шестизвенный и дополнительно задана во времени ориентация рабочего органа, то $q(t)$ определяется почти однозначным образом из уравнения (6.11), которое допускает даже аналитическое решение (точнее говоря, конечное число решений). В других случаях имеется большая или меньшая свобода в выборе $q(t)$, которую можно использовать для оптимизации тех или иных критериев качества, добиваясь наиболее «экономичного» в некотором смысле движения.

Таким образом, имеется принципиальная возможность определить $q(t)$ в любой момент времени $t_* \in [t_0, t_T]$. Однако практически, не теряя точности решения, можно существенно упростить процесс построения вектор-функции $q(t)$, $t \in [t_0, t_T]$. Для этого, во-первых, следует путем вышеизложенной процедуры найти значения $q(t)$ в дискретном наборе «базовых точек» $q(t_k)$, $k = 1, \dots, N$. Далее можно поступить следующим образом.

Решая линейное уравнение (6.14) или (6.13) при заданной ориентации рабочего органа в окрестности каждой базовой точки t_k , $k = 1, \dots, N$, находим локальную добавку $\Delta q(t_k + \Delta t)$. При этом если основная задача решается с оптимизацией квадратичного критерия качества обобщенной работы

$$J = \int_{t_0}^{t_T} \dot{q}^*(t) C \dot{q}(t) dt, \quad (6.16)$$

где C — некоторая положительно определенная матрица размерности $n \times n$, то здесь следует взять его разностный аналог

$$\hat{J} = \Delta q^* C \Delta q. \quad (6.17)$$

Выпишем явное выражение для Δq в этом случае (см. работу [23]). Обозначив $\Phi = dF/dq$, составим функцию Лагранжа

$$L = \Delta q^* C \Delta q + (\Delta p - \Phi \Delta q) \lambda.$$

Уравнения Лагранжа, решение которых дает экстремум функционалу (6.17) при условии связи (6.14), будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} 2C \Delta q - \lambda \Phi^* &= 0, \\ \Delta p - \Phi \Delta q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.18)$$

Из первого уравнения (6.18) получаем

$$\Delta q = (\lambda/2) C^{-1} \Phi^*. \quad (6.19)$$

Подставляя (6.19) во второе уравнение (6.18), находим

$$\Delta p = (\lambda/2) \Phi C^{-1} \Phi^*. \quad (6.20)$$

Отсюда в случае невырожденности матрицы $D = \Phi C^{-1} \Phi^*$

$$\lambda = 2 (\Phi C^{-1} \Phi^*)^{-1} \Delta p \quad (6.21)$$

и, подставив выражение (6.21) в уравнение (6.19), получим

$$\Delta q = C^{-1} \Phi^* (\Phi C^{-1} \Phi^*)^{-1} \Delta p. \quad (6.22)$$

Если же матрица D вырождена, то вместо нее в выражениях (6.21) и (6.22) следует использовать содержащуюся в ней подматрицу максимального ранга.

Другой путь заключается в использовании сплайн-интерполяции [12, 29], когда ищется приближение вектор-функции $q(t)$ в классе сплайнов, т. е. функций $s_m(q, t)$, где m — порядок сплайна, являющихся полиномом степени m на каждом отрезке $\Delta_k = [t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, N$

$$s_m(q, t) = r_{m, k}(t) = \sum_{j=0}^m a_{j, k} t^j, \quad t \in \Delta_k$$

и удовлетворяющих условиям непрерывности вместе с производными $m-1$ -го порядка в точках разбиения t_k , $k = 1, \dots, N-1$:

$$r_{m, k}^{(i)}(t_k) = r_{m, k+1}^{(i)}(t_k); \quad i = 0, 1, \dots, m-1; \quad k = 1, \dots, N-1.$$

Итак, требуется определить $N(m+1)$ неизвестных $a_{j, k}$, которые удовлетворяют системе из $(N-1)m$ уравнений, являющихся условиями непрерывности. Недостающие уравнения можно получить, накладывая дополнительные условия на свойства $q(t)$.

Поскольку $q(t)$ является вектором обобщенных координат механической системы, физический смысл имеют только первая и вторая производные (скорости и ускорения). Кроме условий непрерывности скоростей и ускорений естественно потребовать их равенство 0 в начальной и конечной точках. При этом минимальный порядок сплайна, удовлетворяющего всем этим условиям, равен четырем, и его можно выбрать специальным образом: на всех промежуточных участках достаточно ограничиться полиномами 3-го (а не 4-го) порядка.

Следуя работе [12], рассмотрим k -й отрезок Δ_k , описываемый вектор-полиномом

$$q(\tau) = a_{0, k} + a_{1, k} \tau + a_{2, k} \tau^2 + a_{3, k} \tau^3 + a_{4, k} \tau^4, \quad \tau \in \Delta_k, \quad (6.23)$$

где $\tau = t/|\Delta_k|$, $|\Delta_k|$ — время прохождения k -го участка траектории, т. е. τ — нормированное время: $\tau \in [0, 1]$ при $t \in [t_{k-1}, t_k]$.

Для того чтобы получить соотношения, связывающие коэффициенты полиномов $a_{j, k}$, $k = 0, 1, \dots, N$ со значениями обобщенных координат $q(t_k)$ и их производных $\dot{q}(t_k)$, $\ddot{q}(t_k)$ в $N+1$ -й точке разбиения отрезка $[t_0, t_T]$, дважды про дифференцируем полином (6.23):

$$\dot{q}(\tau) = |\Delta_k|^{-1} (a_{1, k} + 2a_{2, k} \tau + 3a_{3, k} \tau^2 + 4a_{4, k} \tau^3),$$

$$\ddot{q}(\tau) = |\Delta_k|^{-2} (2a_{2, k} + 6a_{3, k} \tau + 12a_{4, k} \tau^2).$$

Рассмотрим случаи, отвечающие начальному, промежуточному и конечному отрезкам траектории.

1. Начальный отрезок, $k = 1$.

При $\tau = 0$ имеем

$$q(0) = a_{0,1}, \quad \dot{q}(0) = |\Delta_1|^{-1} a_{1,1}, \quad \ddot{q}(0) = 2|\Delta_1|^{-2} a_{2,1}.$$

При $\tau = 1$

$$q(1) = a_{0,1} + a_{1,1} + a_{2,1} + a_{3,1} + a_{4,1},$$

$$\dot{q}(1) = |\Delta_1|^{-1} (a_{1,1} + 2a_{2,1} + 3a_{3,1} + 4a_{4,1}),$$

$$\ddot{q}(1) = |\Delta_1|^{-2} (2a_{2,1} + 6a_{3,1} + 12a_{4,1}).$$

2. Конечный отрезок, $k = N$.

Для удобства сделаем замену переменной $\bar{\tau} = \tau - 1$:

$$q(\bar{\tau}) = a_{0,N} + a_{1,N}\bar{\tau} + a_{2,N}\bar{\tau}^2 + a_{3,N}\bar{\tau}^3 + a_{4,N}\bar{\tau}^4.$$

Тогда при $\bar{\tau} = 0$ получаем

$$q(N) = a_{0,N}, \quad \dot{q}(N) = |\Delta_N|^{-1} a_{1,N}, \quad \ddot{q}(N) = 2|\Delta_N|^{-2} a_{2,N}.$$

При $\bar{\tau} = -1$

$$q(N-1) = a_{0,N} - a_{1,N} + a_{2,N} - a_{3,N} + a_{4,N},$$

$$\dot{q}(N-1) = |\Delta_N|^{-1} (a_{1,N} - 2a_{2,N} + 3a_{3,N} - 4a_{4,N}),$$

$$\ddot{q}(N-1) = |\Delta_N|^{-2} (2a_{2,N} - 6a_{3,N} + 12a_{4,N}).$$

Подставляя $\bar{\tau} = \tau - 1$ в полином, выстраиваемый на последнем отрезке, получаем представление этого полинома в виде функции аргумента τ :

$$q(\tau) = a_{0,N} - a_{1,N} + a_{2,N} - a_{3,N} + a_{4,N} + (a_{1,N} - 2a_{2,N} + 3a_{3,N} - 4a_{4,N})\tau + (a_{2,N} - 3a_{3,N} + 6a_{4,N})\tau^2 + (a_{3,N} - 4a_{4,N})\tau^3 + a_{4,N}\tau^4.$$

3. Промежуточный, k -й отрезок траектории.

Прежде всего полагаем $a_{4,k} = 0$. При $\tau = 0$ имеем

$$q(k-1) = a_{0,k}, \quad \dot{q}(k-1) = |\Delta_k|^{-1} a_{1,k}, \quad \ddot{q}(k-1) = 2|\Delta_k|^{-2} a_{2,k}.$$

При $\tau = 1$

$$q(k) = a_{0,k} + a_{1,k} + a_{2,k} + a_{3,k},$$

$$\dot{q}(k) = |\Delta_k|^{-1} (a_{1,k} + 2a_{2,k} + 3a_{3,k}),$$

$$\ddot{q}(k) = |\Delta_k|^{-2} (2a_{2,k} + 6a_{3,k}).$$

Исключив из уравнений для всех отрезков траекторий ($k = 1, \dots, N$) величины $\dot{q}(k)$, $\ddot{q}(k)$, $k = 1, \dots, N-1$, определим коэффициенты $a_{j,k}$. Тем самым будет построена непрерывная вектор-функция $q(t)$, $t \in [t_0, t_T]$.

Рассмотрим в качестве примера плоский трехзвенник (см. рис. 6.3). Пусть требуется перейти из точки с координатами $p^0 = (p_1^0, p_2^0)^*$ в конфигурации $q^0 = (q_1^0, q_2^0, q_3^0)^*$ в близкую точку $p^1 = (p_1^1, p_2^1)^*$ с минимизацией критерия (6.17) при диагональной весовой матрице $C = \text{diag}(c_1, c_2, c_2)$. Тогда согласно формуле (6.22) получаем конечную конфигурацию:

$$q^1 = q^0 + \Delta q = q^0 + C^{-1}\Phi^*(\Phi C^{-1}\Phi^*)^{-1} \Delta p =$$

$$= \begin{bmatrix} q_1^0 \\ q_2^0 \\ q_3^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & c_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & c_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{21} \\ \varphi_{12} & \varphi_{22} \\ \varphi_{13} & \varphi_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 c_i \varphi_{1i}^2 & \sum_{i=1}^3 c_i \varphi_{1i} \varphi_{2i} \\ \sum_{i=1}^3 c_i \varphi_{1i} \varphi_{2i} & \sum_{i=1}^3 c_i \varphi_{2i}^2 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} p_1 - p_1^0 \\ p_2 - p_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^0 \\ q_2^0 \\ q_3^0 \end{bmatrix} + \frac{1}{c_1 c_2 \alpha^2 + c_1 c_3 \beta^2 + c_2 c_3 \gamma^2} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} (c_2 \Phi_{22} \alpha + c_3 \Phi_{23} \beta) / c_1 & -(c_2 \Phi_{12} \alpha + c_3 \Phi_{13} \beta) / c_1 \\ (c_3 \Phi_{23} \gamma - c_1 \Phi_{21} \alpha) / c_2 & (c_1 \Phi_{11} \alpha - c_3 \Phi_{13} \gamma) / c_2 \\ -(c_1 \Phi_{21} \beta - c_2 \Phi_{22} \gamma) / c_3 & (c_1 \Phi_{11} \beta - c_2 \Phi_{12} \gamma) / c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 - p_1^0 \\ p_2 - p_2^0 \end{bmatrix},$$

где $\alpha = \Phi_{11}\Phi_{22} - \Phi_{12}\Phi_{21} = l_1(l_2 \sin q_3 + l_2 \sin(q_2 + q_3))$,
 $\beta = \Phi_{11}\Phi_{23} - \Phi_{13}\Phi_{21} = l_3(l_1 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin q_3)$,
 $\gamma = \Phi_{12}\Phi_{23} - \Phi_{13}\Phi_{22} = l_3(l_2 \sin q_3 - l_1 \sin q_1 \cos(q_1 + q_2 + q_3))$.

6.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРОВ

Исследование динамики механической системы манипуляторов является необходимым этапом как при анализе, так и синтезе процессов управления движением робота. С одной стороны, эти исследования заключаются в аналитическом анализе и моделировании движения манипуляторов, а с другой, служат основой для синтеза алгоритмов управления.

Удобным средством описания динамики механической системы манипулятора, представляющей собой голономную систему с n степенями свободы, служат уравнения Лагранжа II рода [29]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k, \quad k = 1, \dots, n, \quad (6.24)$$

где $L = T - \Pi$ — функция Лагранжа системы; T — кинетическая энергия системы; Π — потенциальная энергия системы; $\dot{q}_k$ — обобщенные скорости; q_k — обобщенные координаты; Q_k — обобщенные силы.

Выведем уравнения Лагранжа, воспользовавшись при этом соотношениями из параграфа 6.2. Кинетическая энергия манипулятора равна сумме кинетических энергий его звеньев (груз считаем частью последнего звена):

$$T = \sum_{i=1}^n T_i,$$

где T_i — кинетическая энергия i -го звена.

Обозначим через $\mathbf{r}_p^i = (\mathbf{x}_p^i, 1)^* = (x_{p1}^i, x_{p2}^i, x_{p3}^i, 1)^*$ радиус-вектор некоторой точки i -го звена в системе координат, связанной с p -м звеном ($i = 1, \dots, n$; $p = 0, 1, \dots, n$), и положим $\mathbf{r}^i = \mathbf{r}_0^i$. Тогда для элемента i -го звена dm_i соответствующий ему элемент энергии

$$dT_i = \frac{1}{2} |\dot{\mathbf{r}}^i|^2 dm_i, \quad (6.25)$$

где $\mathbf{r}_p^i$ — радиус-вектор этого элемента; $p = 0, 1, \dots, n$.

Из формулы (6.6) следует, что

$$dT_i = \frac{1}{2} (\dot{B}_i \mathbf{r}_i^i, \dot{B}_i \mathbf{r}_i^i) dm_i,$$

где $B_i = B_i(q)$ — матрица перехода от i -й системы координат к системе координат, связанной с основанием.

Воспользовавшись известным соотношением для векторов a и b

$$(a, b) = a^*b = \text{tr}(ab^*),$$

где $\text{tr}(\cdot)$ — след матрицы, т. е. сумма ее диагональных элементов, перепишем формулу (6.25) в другом виде:

$$dT_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{B}_i r_i^t r_i^{t*} \dot{B}_i^*) dm_i.$$

Полная кинетическая энергия i -го звена

$$T_i = \int dT_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{B}_i (\int r_i^t r_i^{t*} dm_i) \dot{B}_i^*),$$

где интеграл берется по объему i -го звена.

Назовем матрицей инерции i -го звена [29]

$$H_i = \int r_i^t r_i^{t*} dm_i =$$

$$= \begin{bmatrix} \int (x_{i1}^t)^2 dm_i & \int x_{i2}^t x_{i1}^t dm_i & \int x_{i3}^t x_{i1}^t dm_i & \int x_{i1}^t dm_i \\ \int x_{i1}^t x_{i2}^t dm_i & \int (x_{i2}^t)^2 dm_i & \int x_{i3}^t x_{i2}^t dm_i & \int x_{i2}^t dm_i \\ \int x_{i1}^t x_{i3}^t dm_i & \int x_{i2}^t x_{i3}^t dm_i & \int (x_{i3}^t)^2 dm_i & \int x_{i3}^t dm_i \\ \int x_{i1}^t dm_i & \int x_{i2}^t dm_i & \int x_{i3}^t dm_i & m_i \end{bmatrix}, \quad (6.26)$$

где m_i — масса i -го звена.

Тогда

$$T_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{B}_i H_i \dot{B}_i^*)$$

и

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{tr}(\dot{B}_i H_i \dot{B}_i^*). \quad (6.27)$$

Потенциальная энергия Π манипулятора, очевидно, определяется формулой

$$\Pi = g\theta_3 \sum_{i=1}^n m_i B_i r_{c,i}, \quad (6.28)$$

где g — ускорение силы тяжести; $\theta_3 = (0, 0, 1, 0)^*$; $r_{c,i}$ — радиус-вектор центра масс i -го звена в системе координат, связанной с этим звеном, $i = 1, \dots, n$.

Определим производные от T и Π для уравнений (6.24). Так как

$$\dot{B} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial B_i}{\partial q_j} \dot{q}_j = \sum_{j=1}^n B_i^j \dot{q}_j,$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j,l=1}^l \text{tr} (B_i^j H_l B_l^{l*}) \dot{q}_j \dot{q}_l.$$

(Здесь матрицы B_i^j , как и приведенные ниже матрицы B_i^{jl} , определены формулой (6.8) и $B_i^j = 0$ для $j > l$.) Вычислим производные от T , пользуясь тем, что $\text{tr} (AHB^*) = \text{tr} (BHA^*)$, если $H = H^*$, и перегруппировывая слагаемые:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial q_k} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j,l=1}^l [\text{tr} (B_i^{lk} H_l B_l^{l*}) + \text{tr} (B_i^l H_l B_l^{lk*})] \dot{q}_j \dot{q}_l = \\ &= \sum_{i=k}^n \sum_{j,l=1}^l \text{tr} (B_i^{lk} H_l B_l^{l*}) \dot{q}_j \dot{q}_l; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l [\text{tr} (B_i^j H_l B_l^{k*}) + \text{tr} (B_i^k H_l B_l^{j*})] \dot{q}_j = \\ &= \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^l \text{tr} (B_i^j H_l B_l^{k*}) \dot{q}_j; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} &= \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^l \left\{ \sum_{l=1}^l [\text{tr} (B_i^{ll} H_l B_l^{k*}) \dot{q}_j \dot{q}_l + \text{tr} (B_i^j H_l B_l^{k*}) \dot{q}_k \dot{q}_l] + \right. \\ &\quad \left. + \text{tr} (B_i^l H_l B_l^{k*}) \ddot{q}_j \right\} = \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^l \text{tr} (B_i^j H_l B_l^{k*}) \ddot{q}_j + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{i=k}^n \sum_{j,l=1}^l [\text{tr} (B_i^{lk} H_l B_l^{l*}) + \text{tr} (B_i^{ll} H_l B_l^{k*})] \dot{q}_j \dot{q}_l, \quad k = 1, \dots, n.$$

Производные от потенциальной энергии Π

$$\partial \Pi / \partial \dot{q}_k = 0, \quad \partial \Pi / \partial q_k = g \theta_3^* \sum_{i=k}^n m_i B_i^k r_{c,i}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Тогда k -е уравнение Лагранжа в явном виде будет иметь вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^l \text{tr} (B_i^j H_l B_l^{k*}) \ddot{q}_j + \sum_{i=k}^n \sum_{j,l=1}^l \text{tr} (B_i^{ll} H_l B_l^{k*}) \dot{q}_j \dot{q}_l - \\ - g \theta_3^* \sum_{i=k}^n m_i B_i^k r_{c,i} = M_k, \quad k = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6.29)$$

В результате, перегруппировывая слагаемые в уравнении (6.29), получаем окончательный вид уравнения Лагранжа:

$$A(q) \ddot{q} + b(q, \dot{q}) = M, \quad (6.30)$$

где $A(q) = \{a_{0k}^t\}_{t,k=1}^n$ — симметричная матрица размерности $n \times n$;

$$b(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ik}^t \dot{q}_j \dot{q}_i + a_{2k} - \text{вектор размерности};$$

$$a_{0k}^t = \sum_{l=\max(t,k)}^n \text{tr}(B_l^t H_l B_l^{k*});$$

$$a_{ik}^t = \sigma_{it} \sum_{l=\max(t,k)}^n \text{tr}(B_l^t H_l B_l^{k*});$$

$$a_{2k} = g\theta_3^* \sum_{i=k}^n m_i B_i^k r_{c,i};$$

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j=i, \\ 2, & \text{если } j \neq i, \quad i, j, k, \dots, n; \end{cases} \quad (6.31)$$

$M_k \equiv Q_k = M_{\text{вк}} + M_{\text{вк}}$ — обобщенная сила, действующая в k -м сочленении; $M_{\text{вк}}$ — момент силы или усилие на выходе k -го привода; $M_{\text{вк}}$ — внешний возмущающий момент или усилие, отнесенные к k -й обобщенной координате, $k = 1, \dots, n$.

Найдем выражение для $M_{\text{вк}}$, $k = 1, \dots, n$, через активные силы, действующие на манипулятор. Эти силы могут иметь различное происхождение. К ним, в частности, относятся силы сопротивления внешней среды, нагрузка, приложенная к рабочему органу, и т. п. Будем рассматривать четырехмерные векторы сил $f = (f_1, f_2, f_3, 0)^*$ в системе координат, связанной с основанием.

Пусть на элемент dm_i i -го звена действует элемент силы df_i . Сообщим элементу dm_i виртуальное перемещение δr^i . На этом перемещении элементарная работа

$$\begin{aligned} \delta A_i &= (df_i, \delta r^i) = (df_i, \delta(B_i r_i^t)) = \text{tr} \left(df_i r_i^{t*} \sum_{j=1}^t B_j^t \delta q_j \right) = \\ &= \sum_{j=1}^t \text{tr} (df_i r_i^{t*} B_j^{t*}) \delta q_j. \end{aligned} \quad (6.32)$$

Проинтегрировав равенство (6.32) по объему i -го звена и произведя суммирование полученных интегралов по всем звеньям, получим выражение для работы всех активных сил, действующих на манипулятор:

$$\begin{aligned} \delta A &= \sum_{i=1}^n \int (df_i, \delta r^i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t \text{tr} \left(\left(\int r_i^t df_i^* \right)^* B_j^{t*} \right) \delta q_j = \\ &= \sum_{j=1}^t \left(\sum_{i=1}^n \text{tr} \left(\left(\int r_i^t df_i^* \right)^* B_j^{t*} \right) \right) \delta q_j. \end{aligned}$$

Обобщенные силы $M_{\text{вк}}$ определяются равенством

$$\delta A = \sum_{k=1}^n M_{\text{вк}} \delta q_k,$$

поэтому

$$M_{\text{вк}} = \sum_{i=k}^n \text{tr} \left(\left(\int r_i^t df_i^* \right)^* B_i^{t*} \right).$$

В результате получаем

$$M_{Bk} = \sum_{i=k}^n \text{tr} (\Phi_i B_i^{k*}), \quad (6.33)$$

где

$$\Phi_i = \left(\int r_i^t df_i^* \right)^* = \begin{bmatrix} \int x_{i1}^t df_{i1} & \int x_{i2}^t df_{i1} & \int x_{i3}^t df_{i1} & \int df_{i1} \\ \int x_{i1}^t df_{i2} & \int x_{i2}^t df_{i2} & \int x_{i3}^t df_{i2} & \int df_{i2} \\ \int x_{i1}^t df_{i3} & \int x_{i2}^t df_{i3} & \int x_{i3}^t df_{i3} & \int df_{i3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

матрица сил, действующих на i -е звено [30].

Рассмотрим в виде примера плоский двухзвенник, получающийся из трехзвенника на рис. 6.3 отбрасыванием последнего звена, т. е. положим $l_3 = 0$. Кроме того, будем считать, что массы звеньев сосредоточены в точках A_1 и A_2 , отстоящих на расстоянии r_i от шарниров. Тогда кинетическая энергия манипулятора зависит от скоростей точек A_1 и A_2 и равна

$$T = \frac{m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2}{2} = \frac{1}{2} [(m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2 + 2l_1 r_2 \cos q_2)) \dot{q}_1^2 + \\ + m_2 r_2^2 \dot{q}_2^2 + 2(m_2 r_2^2 + l_1 r_2 \cos q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2].$$

Производные от кинетической энергии равны

$$\partial T / \partial q_1 = 0, \quad \partial T / \partial q_2 = -m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2),$$

$$\partial T / \partial \dot{q}_1 = (m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + 2l_1 r_2 \cos q_2 + r_2^2)) \dot{q}_1 + m_2 r_2 (r_2 + l_1 \cos q_2) \dot{q}_2,$$

$$\partial T / \partial \dot{q}_2 = m_2 r_2^2 \dot{q}_2 + m_2 r_2 (r_2 + l_1 \cos q_2) \dot{q}_1,$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} = (m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + 2l_1 r_2 \cos q_2 + r_2^2)) \ddot{q}_1 + (m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos q_2) \ddot{q}_2 - \\ - 2m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_2^2.$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} = m_2 r_2^2 \ddot{q}_2 + (m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos q_2) \ddot{q}_1 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2.$$

Потенциальная энергия и ее производные равны

$$\Pi = [m_1 r_1 \cos q_1 + m_2 (l_1 \cos q_1 + r_2 \cos (q_1 + q_2))] g,$$

$$\partial \Pi / \partial q_1 = -[m_1 r_1 + m_2 l_1 \sin q_1 + m_2 r_2 \sin (q_1 + q_2)] g,$$

$$\partial \Pi / \partial q_2 = -m_2 r_2 \sin (q_1 + q_2) g.$$

Окончательно получаем уравнения Лагранжа

$$(m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2 + 2l_1 r_2 \cos q_2)) \ddot{q}_1 + m_2 r_2 (r_2 + l_1 \cos q_2) \ddot{q}_2 - \\ - 2m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_2^2 + [(m_1 r_1 + m_2 l_1) \sin q_1 + \\ + m_2 r_2 \sin (q_1 + q_2)] g = M_1,$$

$$m_2 r_2 (r_2 + l_1 \cos q_2) \ddot{q}_1 + m_2 r_2^2 \ddot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2 - 2m_2 r_2 l_1 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \\ + m_2 r_2 \sin (q_1 + q_2) g = M_2.$$

6.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ЭВМ

Как уже отмечалось, роботы являются сложными техническими объектами, для разработки и исследования которых требуются новые методы, связанные как с привлечением довольно тонких аналитических средств, так и с применением современной вычислительной техники. В частности, одним из наиболее эффективных инструментов исследований поведения манипуляторов робота при функционировании в различных условиях служит имитационное моделирование на ЭВМ. Такое моделирование на этапе проектирования робота позволяет оптимизировать конструкцию его механической части, характеристики приводов и датчиков, структуру и параметры системы управления. Это осуществляется путем «проигрывания» на ЭВМ различных интересующих разработчика вариантов и ситуаций с их наглядным при этом отображением. Применение такой процедуры позволяет существенно повысить технический уровень роботов, сократить сроки их создания и подготовить базу для алгоритмического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования роботов.

Основой имитационной модели манипулятора является алгоритмическое обеспечение, которое включает следующие элементы:

- 1) соотношения, связывающие обобщенные координаты манипулятора с декартовыми координатами его рабочего органа;
- 2) алгоритмы синтеза траекторий движения манипуляторов, обеспечивающих желаемые перемещения рабочего органа;
- 3) уравнения, описывающие динамику механической части манипулятора;
- 4) уравнения, описывающие приводы манипулятора;
- 5) алгоритмы управления движениями манипулятора.

В совокупности система уравнений, являющаяся аналитической моделью манипулятора, может быть записана в виде

$$\begin{aligned} q_p(t) &= F^{-1}(p_p(t)), \\ \sigma &= f(q, q_p, \dot{q}, \dot{q}_p, \dots, q^{(l)}, q_p^{(m)}), \\ G = (q, q^{(1)}, \dots, q^{(n_1)}, \sigma, \sigma^{(1)}, \dots, \sigma^{(n_2)}, M_p, M_p^{(1)}, \dots, M_p^{(n_3)}) &= 0, \\ M_p^{(i)}(0) &= M_p^{(i)}, \quad i = 1, \dots, n_3, \\ A(q) \ddot{q} + b(q, \dot{q}) &= M_p + M_n, \quad q(0) = q_0, \quad \dot{q}(0) = \dot{q}_0, \\ p(t) &= F(q(t)). \end{aligned}$$

(6.34)

При этом считаем заданным желаемое (программное) перемещение рабочего органа манипулятора во времени $p_p(t)$, $t \in [t_0, t_f]$. Первое и последнее уравнения системы (6.34) связывают обобщенные координаты манипулятора и декартовы координаты его рабочего органа (см. параграф 6.2): первое уравнение задает программное изменение обобщенных координат $q_p(t)$, $t \in [t_0, t_f]$, а последнее

определяет положение рабочего органа $p(t)$ по действительным обобщенным координатам. Второе уравнение определяет управляющее воздействие v (с учетом обратных связей по положению и его производным). Некоторые конкретные алгоритмы управления рассмотрены в параграфе 6.6. Приводы манипулятора можно трактовать как преобразователь входного воздействия v в выходное M [вектор моментов (усилий) на выходах приводов], который, если пренебречь нелинейностями в приводах, описывается векторным обыкновенным дифференциальным уравнением типа третьего уравнения системы (6.34), где $q^{(i_1)}, v^{(i_2)}, M^{(i_3)}$ — производные соответствующих порядков векторов q, v, M_n , $i_1 = 1, \dots, n_1$, $i_2 = 1, \dots, n_2$, $i_3 = 1, \dots, n_3$. Четвертое уравнение (6.34) является уравнением Лагранжа II рода механической системы манипулятора, которое подробно рассматривалось в параграфе 6.4.

Задача моделирования движений манипулятора на ЭВМ заключается в численном решении системы уравнений (6.34). Наиболее существенной частью этой системы уравнений являются дифференциальные уравнения, описывающие механическую систему манипулятора и его приводов. При этом в связи с тем, что переходные процессы в приводах протекают обычно существенно быстрее, чем в механической системе манипулятора, возникает возможность раздельно интегрировать эти уравнения, а иногда и упрощать уравнение приводов путем сведения его к функциональному уравнению.

Дифференциальные уравнения следует предварительно разрешать относительно старших производных, приводя их к нормальному виду

$$\dot{y} = g(t, y), \quad y(0) = y_0. \quad (6.35)$$

После этого их можно решать одним из известных методов численного интегрирования.

Остановимся коротко на выборе этих методов. Метод Рунге—Кутты обладает, как известно, хорошей точностью, но предполагает многократное вычисление правых частей (особенно при автоматическом выборе шага интегрирования). Поэтому в задачах моделирования движений манипуляторов, где для вычисления правых частей требуется большая затрата машинного времени, это является существенным неудобством. В таких случаях более эффективно применять многоступенчатые методы типа Адамса—Мултона, в которых многократное вычисление правых частей производится только в нескольких первых точках, а в дальнейшем правая часть вычисляется только по одному разу в каждой точке. В задачах моделирования движения манипуляторов, когда управление осуществляется с использованием обратных связей, которые не дают накопиться большим ошибкам по фазовым координатам манипулятора, эффективным является применение совсем простого метода Эйлера.

Техническим средством имитационной модели служат пакеты программ, составленные на одном из известных алгоритмических языков (АЛГОЛ-60, ФОРТРАН-4, PL-1 и т. п.). Рассмотрим обобщенную структурную схему такого пакета [12] (рис. 6.4). Пакет

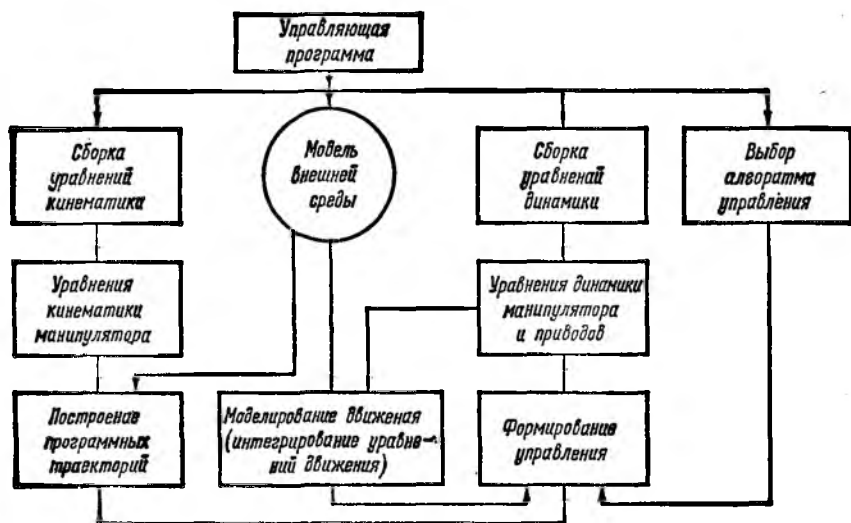


Рис. 6.4. Обобщенная схема пакета программ

имеет модульную структуру и оформлен в виде головной управляющей программы и набора подпрограмм. Управляющая программа осуществляет ввод исходных данных, предварительную их обработку и формирование задания. В блоке «сборка уравнений кинематики» согласно формулам (6.1) и (6.6) производится формирование матриц A_i , B_i , $i = 1, \dots, n$ преобразования систем координат манипулятора, связанных со звеньями. В результате в блоке «уравнения кинематики манипулятора» формируются программы, осуществляющие связь между обобщенными координатами манипулятора и декартовыми координатами его рабочего органа. Эти программы совместно с информацией о внешней среде позволяют строить программные траектории манипулятора, моделирование движения по которым осуществляется «динамической» частью пакета. В блоке «сборка уравнений динамики» вычисляются коэффициенты уравнения Лагранжа (6.30), а в блоке «уравнения динамики манипулятора и приводов» формируются правые части заданных в нормальном виде дифференциальных уравнений системы (6.34), описывающих механическую часть манипулятора и его приводы. Далее, для того чтобы получить уравнения динамики всей системы в целом, необходимо вычислить управляющие воздействия для выбранного алгоритма управления. При этом используется информация о программных траекториях, действительном состоянии манипулятора и внешней среде (прежде всего о возмущающих моментах и силах).

6.6. СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ

При решении этой задачи манипулятор рассматривается как объект управления, целью которого является обеспечение обработки заданной программной траектории $q_p(t)$, $t \in [t_0, t_f]$, синте-

вированной, например, с помощью методов, описанных в параграфе 6.3. Основное требование при обработке заданной траектории — обеспечение достаточной малости динамической ошибки $\Delta q(t) = q(t) - q_p(t)$. Существенное значение имеют, конечно, качество переходных процессов и энергозатраты. Главными характеристиками при этом являются движение непосредственно рабочего органа и его отклонение от программной траектории:

$$\Delta p = p - p_p = F(q) - F(q_p),$$

где F — определенный формулой (6.10) оператор перехода от обобщенных координат манипулятора к декартовым координатам рабочего органа.

Вышеизложенные соображения учитываются при формировании критериев качества управления манипуляторами. Таким критерием может послужить квадратичная интегральная динамическая ошибка рабочего органа

$$J_p = \int_{t_0}^{t_T} (\Delta p)^2(t) dt.$$

При этом, если считать отклонения от программных значений достаточно малыми, то, воспользовавшись уравнением (6.14), можно переписать это выражение в виде

$$J_p = \int_{t_0}^{t_T} \Delta q^*(t) \left[\left(\frac{\partial F}{\partial q} \right)^* \left(\frac{\partial F}{\partial q} \right) \right] \Big|_0 \Delta q dt, \quad (6.36)$$

где обозначение $[\dots]_0$ показывает, что это выражение вычисляется в точке программной траектории $q_p(t)$.

Другим критерием является функционал, характеризующий энергетические затраты на управление манипулятором,

$$J_v = \int_{t_0}^{t_T} c^* \Delta v^2(t) dt, \quad (6.37)$$

где $\Delta v = v - v_p$ — вектор отклонения управляющих воздействий от их программных значений; $c = (c_1, \dots, c_n)^*$ — весовой вектор.

Комплексный критерий, обобщающий критерии (6.36) и (6.37), имеет вид

$$J = \int_{t_0}^{t_T} (\Delta z^* \Omega_z \Delta z + \Delta v^* \Omega_v \Delta v) dt, \quad (6.38)$$

где $\Delta z = z - z_p = (q, \dot{q})^* - (q_p, \dot{q}_p)^*$ — вектор приращения фазовых координат манипулятора; Ω_z, Ω_v — неотрицательно определенные матрицы размерности $2n \times 2n$ и $n \times n$ соответственно.

Если нет особых соображений, в качестве весовой матрицы Ω_z выбирают единичную матрицу. Матрицу Ω_z целесообразно выбирать в виде [30]

$$\Omega_z = \begin{bmatrix} \alpha_0 \left[\left(\frac{\partial F}{\partial q} \right)^* \left(\frac{\partial F}{\partial q} \right) \right] \Big|_0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 \left[\left(\frac{\partial F}{\partial q} \right)^* \left(\frac{\partial F}{\partial q} \right) \right] \Big|_0 \end{bmatrix},$$

где α_0, α_1 — скалярные коэффициенты.

Задачей системы управления является удержание действительных значений обобщенных координат $q_i(t)$ вблизи их заданных значений $q_{p,i}(t)$ с допустимой погрешностью $i = 1, \dots, n$. Решение этой задачи заключается обычно в расчете, запоминании и выдаче значений вектора $q_p(t_k)$, $k = 0, 1, \dots$ в дискретные моменты времени $t_0, t_1, \dots$ на входы приводов манипулятора, являющихся следящими системами с обратной связью по положению. При этом система управления может работать в двух режимах. В первом режиме новая уставка $q_p(t_{k+1})$ подается лишь после отработки приводами всех компонент $q_{p,i}$, $i = 1, \dots, n$ предыдущего ее значения $q_p(t_k)$ с некоторой требуемой точностью (позиционный режим). Во втором режиме, характерном для контурного управления, уставки $q_p(t_k)$ подаются с определенной частотой независимо от точности отработки предыдущих значений $q_p(t_k)$, кроме конечного значения $q_p(t_T)$.

При синтезе систем управления манипуляторами возникает ряд принципиальных трудностей, обусловленных многосвязностью, нелинейностью и нестационарностью объекта управления. Прежде всего уравнения Лагранжа, описывающие механическую систему манипулятора, являются нелинейными дифференциальными уравнениями. Кроме того, приводы степеней подвижности содержат нелинейности типа зон нечувствительности, насыщения, неоднозначностей и т. д. Если пренебречь нелинейностями в приводах, то манипулятор как объект управления можно описать следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A(q) \dot{p}^2 q + b_1(q, p\dot{q}) + b_2(q) + b_3 &= u, \\ u &= W_v(p) v - J_{\text{дл}} \dot{p}^2 q, \\ v &= W_1(p) (q - q_p) - W_2(p) \dot{q}, \end{aligned} \right\} \quad (6.39)$$

где $b_1(q, p\dot{q})$, $b_2(q)$ — составляющие вектора $b(q, p\dot{q})$ из уравнения Лагранжа (6.30), обусловленные скоростями и силой тяжести соответственно; b_3 — вектор обобщенных возмущающих сил; u — вектор моментов, развиваемых на выходах приводов; v — вектор управляющих воздействий; $W_1(p)$ — передаточная матрица последовательных корректирующих устройств; $W_2(p)$ — передаточная матрица параллельных корректирующих устройств; $W_v(p)$ — передаточная матрица, описывающая преобразование управляющих воздействий на входы приводов в моменты на их выходах; $J_{\text{дл}} = \text{diag}(J_{\text{дл1}}, \dots, J_{\text{дл}n})$ — диагональная матрица приведенных к вы-

ходным валам приводов моментов инерции двигателей; p — оператор дифференцирования.

Путем простых подстановок можно привести эту систему уравнений к одному уравнению

$$\begin{aligned} (J_{\pi} + A(q)) p^2 q + b_1(q, \\ pq) + b_2(q) + b_3 = \\ = W_0 W_1(p)(q - \\ - q_p) - W_0 W_2(p) q, \quad (6.40) \end{aligned}$$

которому отвечает структурная схема, изображенная на рис. 6.5.

Для многосвязного объекта обычно синтезируют прежде всего автономные системы управления каждым каналом, а затем производят их взаимную коррекцию. В случае манипуляторов предпосылками такого упрощенного подхода служат следующие обстоятельства. Во-первых, при использовании редукторов с большими передаточными отношениями величины $J_{\pi i}$, $i = 1, \dots, n$, намного больше элементов матрицы $A(q)$, которыми в этом случае можно пренебречь. Если этого нет, то матрицу $A(q)$ можно заменить на диагональную матрицу $J_{\pi} = \text{diag}(J_{\pi 1}, \dots, J_{\pi n})$, элементами которой являются так называемые эффективные моменты инерции $J_{\pi i}$, $i = 1, \dots, n$, отнесенные к обобщенной координате q_i и представляющие собой моменты инерции $i + 1$ -го, ..., n -го звеньев манипулятора [29]:

$$J_{\pi i} = \frac{\partial u_i}{\partial \dot{q}_i} = \left(\frac{\partial \dot{q}_i}{\partial u_i} \right)^{-1} = \left(\frac{\partial \{A^{-1}(q)(u - b)\}_{ii}}{\partial u_i} \right)^{-1} = (\{A^{-1}(q)\}_{ii})^{-1}.$$

Во-вторых, при скоростях движения рабочего органа манипулятора, не превышающих 0,5 м/с, обычно можно пренебречь влиянием смешанных произведений скоростей в члене

$$\begin{aligned} b_1(q, pq) = b'_1(q, pq) + b''_1(q, pq) = \sum_{i=1}^n c'_i(q) \dot{q}_i^2 + \\ + \sum_{i \neq j, i, j=1}^n c''_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j, \end{aligned}$$

т. е. составляющей $b'_1(q, pq)$ (здесь $c'_i(q)$ и $c''_{ij}(q)$ — n -мерные векторы) [14].

В некоторых случаях можно пренебречь и всем членом $b_1(q, pq)$. В результате этих упрощений уравнение (6.40) приобретает вид

$$\begin{aligned} (J_{\pi} + J_{\pi}) p^2 q = W_0 W_1(p)(q - q_p) - W_0 W_2(p) q - \\ - b'_1(q, pq) - b_2(q) - b_3. \quad (6.41) \end{aligned}$$

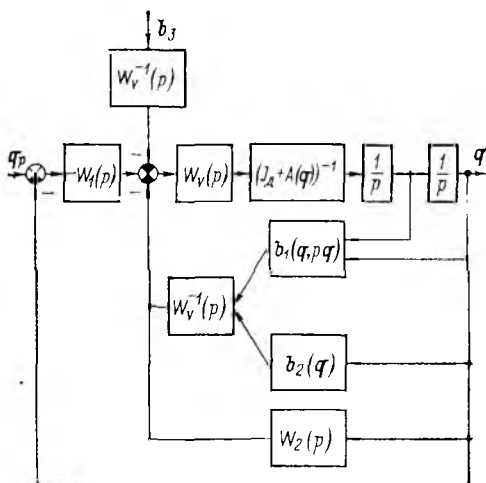


Рис. 6.5. Структурная схема, соответствующая уравнению (6.40) манипулятора

Считая здесь J_n , $c_i(q)$, $b_2(q)$, $b'_3(b'_3)$ — вектор известных внешних возмущающих сил) постоянными величинами в рабочей зоне манипулятора, синтез корректирующих устройств $W_1(p)$ и $W_2(p)$ можно осуществить обычными методами теории автоматического управления [37] с учетом неравного вклада обобщенных координат в ошибку позиционирования рабочего органа, отраженного в критерии качества (6.38). В частности, корректирующие устройства можно выбирать в таком виде [29]:

$$W_1(p) = W_0^{-1}(p) (J_n + J_d) (\Gamma_0 + \Gamma_1 p),$$

$$W_2(p) = W_0^{-1}(p) [(J_n + J_d) p^2 - b_2 - b'_3]$$

с состоящими из отрицательных чисел диагональными матрицами Γ_0 , Γ_1 . Такой выбор обеспечивает компенсацию инерционных сил, соответствующих программным ускорениям, сил тяжести, известных внешних возмущающих сил. Приближенное выражение для ошибки $\Delta q = q - q_p$ в этом случае выглядит так:

$$\Delta q = \frac{b_3 - b'_3}{p^2 (J_n + J_d) - p \Gamma_1 - \Gamma_0},$$

а ее установившееся значение равно $(b_3 - b'_3)/\Gamma_0$. Таким образом, коэффициенты $\Gamma_{0,i}$, $i = 1, \dots, n$ могут выбираться исходя из допустимого уровня установившейся ошибки, и коэффициенты $\Gamma_{1,i}$ удобно взять равными $\sqrt{2\Gamma_{0,i}}$, что является максимальным значением, сохраняющим апериодичность переходного процесса.

Проверку работоспособности синтезированной системы управления и необходимую коррекцию для учета взаимовлияния каналов можно осуществить, анализируя ее частотные свойства. Для этого прежде всего надо линеаризовать систему путем перехода к приращениям относительно заданной программной траектории $q_p(t)$, $t \in [t_0, t_T]$. В результате получают линейное, но нестационарное уравнение. Дальнейшее возможное упрощение задачи основано на использовании того обстоятельства, что обычно переходные процессы в системе управления протекают существенно быстрее, чем изменение $q_p(t)$. Это позволяет применить метод «замороженных» коэффициентов, т. е. считать коэффициенты линеаризованного уравнения локально постоянными.

Кроме того, можно воспользоваться методом выделенных систем управления, заключающимся в игнорировании взаимодействия систем управления каждым отдельным каналом, когда при анализе i -й системы управления условно предполагается отсутствие движения в остальных степенях подвижности, т. е. $q_j(t) = \text{const}$, при $j \neq i$.

Другой метод исследования синтезированной системы заключается в имитационном моделировании на ЭВМ ее функционирования в различных режимах.

Описанный подход позволяет достаточно просто синтезировать системы управления манипуляторов, однако он непригоден, когда движения звеньев манипулятора динамически существенно связаны.

В этих случаях необходимо рассматривать манипулятор в целом как единый объект управления, а систему его управления — соответственно в виде многомерной, многосвязной системы. Кроме того, матрицы $A(q)$, $J_n(q)$, векторы $b(q, pq)$, b_3 меняются в процессе движения.

Эти соображения являются определяющими при введении ЭВМ непосредственно в контур управления. Использование ЭВМ позволяет добиться существенно лучшего качества управления за счет учета и компенсации как можно большего числа динамических и статических эффектов.

В частности, руководствуясь уравнением (6.40), можно рассмотреть алгоритмы управления вида [21, 33]

$$\dot{v} = W_v^{-1}(p) A(q) [p^2 q_p + (\Gamma_1 p + \Gamma_0)(q - q_p)] + b(q, pq) + b_3, \quad (6.42)$$

где матрицы Γ_0 , Γ_1 уже не диагональные, а такие, что матрица

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & E_n \\ \Gamma_0 & \Gamma_1 \end{bmatrix}$$

размерности $2n \times 2n$ является устойчивой (гурвицевой), т. е. корни уравнения

$$|\lambda E_{2n} - \Gamma| = |\lambda^2 E_n - \lambda \Gamma_1 - \Gamma_0| = 0$$

имеют отрицательные действительные части. (Здесь E_n , E_{2n} — единичные матрицы размерности $n \times n$, $2n \times 2n$ соответственно.) Подставив алгоритм управления (6.42) в уравнение (6.40), получим линейное дифференциальное уравнение для ошибки $\Delta q(t) = q(t) - q_p(t)$ в виде

$$\Delta \ddot{q} + \Gamma_1 \Delta \dot{q} + \Gamma_0 \Delta q = 0,$$

решение которого при любых начальных условиях Δq_0 асимптотически устойчиво благодаря устойчивости матрицы Γ . Выбор же матриц Γ_0 , Γ_1 следует осуществлять, руководствуясь критерием качества (6.38).

В тех случаях, когда массоинерционные и другие характеристики манипулятора и перемещаемого груза заранее неизвестны либо имеют тенденцию к изменению, можно прибегнуть к алгоритму, аналогичному алгоритму (6.42), но использующему, кроме того, адаптивную настройку своих параметров в функции от переменных параметров манипулятора и груза [33].

7.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Сфера применения роботов быстро расширяется, постепенно охватывая все новые области человеческой деятельности. Соответственно быстро растет номенклатура роботов. Уже сегодня количество требуемых типов роботов только общепромышленного применения измеряется сотнями. В связи с этим одними из важнейших и актуальных задач робототехники являются комплексная унификация и стандартизация как самих роботов и их компонентов, так и включающих их типовых технологических комплексов.

По определению Международной организации по стандартизации, *стандартизация* — это установление и применение правил с целью 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 относятся стандарты, методические указания, технические условия и т. п. В СССР существует система стандартов, которая включает стандарты государственные (ГОСТ), республиканские (РСТ), отраслевые (ОСТ), предприятия (СТП).

Унификация — это наиболее эффективный метод стандартизации, заключающийся в рациональном сокращении числа объектов одинакового функционального назначения с целью повысить производительность труда и экономичность производства и эксплуатации, улучшить качество и обеспечить взаимозаменяемость. Унификация является также необходимой общей предпосылкой для развития специализации и автоматизации. Основу унификации составляют типы и ряды унифицируемых объектов.

В СССР и во всем мире работы по унификации и стандартизации в робототехнике разворачиваются, начиная с промышленной робототехники, с последующим распространением результатов на остальные области применения. В связи с этим ниже будем ориентироваться именно на такой подход.

7.2. УНИФИКАЦИЯ

Унификация в робототехнике развивается по трем уровням: для компонентов роботов, собственно роботов и роботизированных технологических комплексов.

Хорошо отработанные и серийно выпускаемые унифицированные компоненты — по существу единственно правильная основа развития робототехники в условиях упомянутого выше быстрого роста

номенклатуры и парка роботов с учетом необходимости при этом оперативного создания, освоения производства и эксплуатации новых типов роботов и их модификаций в соответствии с концепцией развития гибких автоматизированных производств (см. гл. 1).

Благодаря тому, что работы по созданию и освоению производства роботов общепромышленного применения у нас в стране, как сказано в гл. 1, были своевременно организованы в комплексную программу Государственного комитета СССР по науке и технике, в основу развития отечественной робототехники с самого начала был заложен принцип унификации компонентов роботов. В 9-й и 10-й пятилетках были разработаны первые унифицированные приводы и устройства управления для роботов (см. гл. 3). В 11-й пятилетке эта работа была продолжена в части расширения номенклатуры этих компонентов, организации серийного производства и дальнейшего повышения их технического уровня.

Создание унифицированных основных компонентов роботов явилось первым этапом работы по унификации в области робототехники. Ее следующий этап состоит в переходе от унификации основных функциональных частей роботов к унификации всех их конструктивных частей, а также и программного обеспечения на основе *модульного принципа построения* [36].

Сущность этого принципа заключается в построении механических, аппаратных и программных частей робота из более мелких унифицированных частей — модулей, которые позволяют осуществлять различные компоновки из некоторого их набора. Система таких модулей обычно строится по иерархическому принципу, когда более сложные модули состоят из нескольких более мелких модулей. Например, привод, выполненный в виде модуля (см. ниже), является готовой конструктивной частью для сборки манипуляторов и устройств передвижения, приспособленной для соединения с другими подобными модулями. При этом в свою очередь он тоже состоит из ряда модулей, которые позволяют собирать различные модификации этого типа привода.

Частным случаем модуля является агрегат. Он представляет собой унифицированную сборочную единицу определенного функционального назначения. Примерами агрегатного построения являются агрегатные станки, агрегатные системы и комплексы в приборостроении и вычислительной технике (агрегатная система вычислительной техники АСВТ и средств телемеханики АССТ). Агрегаты могут состоять из более мелких модулей и в свою очередь входить в состав других модулей.

Модульный принцип построения роботов позволяет наиболее легко создавать их многочисленные модификации на базе одних и тех же конструктивных частей. При этом возникает возможность в каждом конкретном случае наиболее оптимально выбирать степень кинематической 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 какая-нибудь альтернатива этому принципу на сегодня или в перспективе? Таким принципиально отличным путем решения проблемы может представляться идея создания широко универсальных оцувствленных роботов. Собственно говоря, именно этот путь 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. Вместе с тем сейчас отчетливо прослеживается тенденция к созданию все более функционально сложных роботов, в том числе с техническим зрением и микропроцессорным управлением. Саму идею модульного построения таких роботов можно трактовать как экономически наиболее оптимальный путь создания функциональной избыточности, но не в отдельном роботе, а в рамках всего множества унифицированных его частей — модулей.

Таким образом, модульный принцип построения роботов может рассматриваться не как альтернатива универсальным роботам, а наоборот, как форма реализации этой идеи.

В целом модульный подход к построению роботов дает следующие преимущества:

резко сокращаются сроки создания (с 2—3 лет до 2—4 мес), освоения производства и внедрения новых марок роботов, поскольку они будут собираться из хорошо отработанных серийных компонентов;

возрастает технический уровень роботов и прежде всего повышается их надежность и снижается стоимость; последнее связано не только с удешевлением компонентов роботов при их крупносерийном производстве, но и с уменьшением избыточности в конструкции и параметрах роботов благодаря тому, что появляется возможность для каждого конкретного варианта применения компоновать их из минимально необходимого числа простейших модулей;

снижаются расходы на создание, производство, внедрение и эксплуатацию роботов, существенно упрощается их обслуживание; при этом упрощается также задача модернизации автоматизированных технологических комплексов путем доукомплектования входящих в них роботов новыми модулями и применения отдельных модулей в качестве самостоятельных технологических приспособлений (механические руки, кантователи, межоперационные транспортные устройства и т. д.);

производство роботов сводится главным образом к их сборке из стандартных частей, что может быть организовано практически на любом машиностроительном производстве.

Особо большое значение для повышения технического уровня и эффективности применения роботов имеет создание модульных

устройств управления. При этом важно, что по существу удается решить проблему управления не только самими роботами, но и технологическими комплексами (участками, цехами) в целом. Это позволит резко ускорить, упростить и удешевить создание и широкое внедрение роботов в составе роботизированных технологических комплексов, что в сущности и является конечной целью применения роботов.

Рассмотрим конкретные пути реализации модульного принципа построения механической части роботов, их устройств управления и систем программного обеспечения, разработанные ЦНИИ РТК [36].

Принципы модульного построения механической части роботов. Манипуляторы роботов как объект унификации представляют собой совокупность механической системы и блоков управления ее приводами. Ввиду конструктивного многообразия манипуляторов, большой трудоемкости их проектирования и изготовления унификацию манипуляторов следует считать первоочередной задачей в унификации роботов в целом.

Унификация механической части роботов осуществляется на базе следующих основных принципов.

Первый принцип — однообразие конструкций. Согласно этому принципу требуется создание развернутой по двум направлениям системы модулей как законченных конструктивных единиц манипуляторов (табл. 7.1). По вертикали эта система определяется уровнем модуля, а по горизонтали — количеством типоразмеров модуля данного уровня. (Уровень модуля определяется объемом и сложностью выполняемых им функций.)

Второй принцип заключается в обеспечении максимально возможной конструктивной независимости модулей от вида используемой в них энергии (электрическая, пневматическая, гидравлическая) и от способа управления (цикловой, позиционный, контурный). Следствием этого принципа является минимизация оригинальных узлов и деталей в различных по энергоносителю и способу управления модулях. Другое следствие — необходимость высокой унификации деталей и узлов в рамках всей системы модулей манипуляторов.

Третий принцип: модуль как паспортизированный, постановочный и взаимозаменяемый узел должен обладать максимальной функциональной и конструктивной законченностью.

Четвертый принцип заключается в наличии системы базовых модулей и ограничительного числа их типоразмеров.

Типовой состав системы модулей в общем виде представлен в табл. 7.1. Все модули здесь разбиты на пять уровней. Модуль первого уровня — моноблок является наиболее сложным модулем, который представляет собой механический узел манипулятора, состоящий из исполнительной (механической) и аппаратурной (блоков управления приводами) частей.

Корпус исполнительной части моноблока является частью силовой конструкции манипулятора и в общем случае может воспринимать шесть внешних силовых воздействий (три силы и три момента),

7.1. Унифицированные модули роботов

Наименование	Уровень сложности	Характеристика
Моноблок: пневматический, гидравлический, электромеханический	1	Выполняет конструктивные, приводные и информационные функции одной (двух, трех) степени подвижности робота. В его состав входят модули более низких уровней
Модуль-привод: пневматический, гидравлический, электромеханический	2	Выполняет конструктивные и приводные функции одной степени подвижности. При компоновке робота требуется добавлять информационный модуль и модули 4-го и 5-го уровней
Исполнительный модуль: пневматический, гидравлический, электромеханический	3	Осуществляет функции исполнительного механизма
Аппаратный модуль	3	Выполняет функции блока управления приводами модулей 1-го и 2-го уровней
Информационный модуль	3	Выполняет информационные функции
Механизм	4	Предназначен для передачи и преобразования движения
Элементы: сборка, деталь	5	Неприводные механические или аппаратные простейшие узлы. Неразборные составные части робота

а аппаратная часть обеспечивает работу исполнительной части в соответствии с командами устройства управления робота.

Модуль второго уровня — это модуль-привод. Он также состоит из исполнительной и аппаратной частей и используется в манипуляторах в качестве узла, исполнительная часть которого стыкуется с модулями низких уровней. Однако в отличие от исполнительной части моноблока корпус модуля-привода не является несущим.

Модули третьего уровня — это функциональные блоки, предназначенные для компоновки модулей высших уровней. К ним относятся исполнительный, аппаратный и информационный модули.

Модули четвертого уровня — это механизмы, имеющие одну степень подвижности и выполняющие в манипуляторе вспомогательные функции.

Модули пятого уровня — это простейшие унифицированные механические или аппаратные единицы, используемые в модулях более высоких уровней.

В табл. 7.2 приведены виды модулей 1-го и 2-го уровней. Здесь буквами П, В и К обозначены поступательная, вращательная и качательная степени подвижности, а Пр — привод. Соответственно, например, ВП означает модуль с вращательной и поступательной степенями подвижности, а ПрВ — модуль-привод с вращательной степенью подвижности.

По числу степеней подвижности моноблоки делятся на три группы — с одной, двумя и тремя степенями подвижности.

Как видно из табл. 7.2, модули первого уровня имеют 10 базовых моделей, а модули второго уровня — две.

Наиболее независимым модулем, позволяющим самостоятельно компоновать кинематические схемы манипуляторов, являются моноблоки 1-й группы. В связи с этим на начальном этапе внедрения систем модулей именно их следует считать модулями первой очереди разработки и производства.

Модули-приводы имеют две разновидности — с вращательным и поступательным движением.

В основу создания типоразмерного ряда модулей 1-го и 2-го уровней кладутся две характеристики — установленная мощность одной степени подвижности и паспортная скорость движения выходного вала. Первая характеристика прямо отражает мощность двигателя модуля и косвенно — габарит модуля, его массу и допускаемые внешние силовые воздействия, а вторая характеристика объединяет модули в развернутую по горизонтали систему.

На основе этих характеристик разработан ряд систем модулей для определенных энергоносителей. Так, например, в основу типоразмерного ряда электромеханических модулей положен ряд из шести типов электродвигателей мощностью от 25 до 2200 Вт. При этом каждый вид модуля имеет шесть габаритов, и, кроме того, в каждом габарите содержатся еще три градации модулей по скорости. В результате в одном виде модуля получен ряд из 18 типоразмеров (с соответствующими значениями момента или усилия на выходном звене модуля).

В моноблоках 2-й и 3-й групп каждого звена целесообразно использовать однотипные двигатели. Тогда габарит моноблока определяется типом двигателя, а паспортные скорости степеней подвижности получаются одного порядка.

7.2. Механические модули
1-го и 2-го уровней

Уровень модуля	№ группы	Количество степеней подвижности	Обозначение
1 (моно- блок)	1	1	В К П
	2	2	ВК ВП КК ПП
	3	3	ВКК ВКВ ППВ
2 (модуль- привод)	1	1	ПрВ ПрП

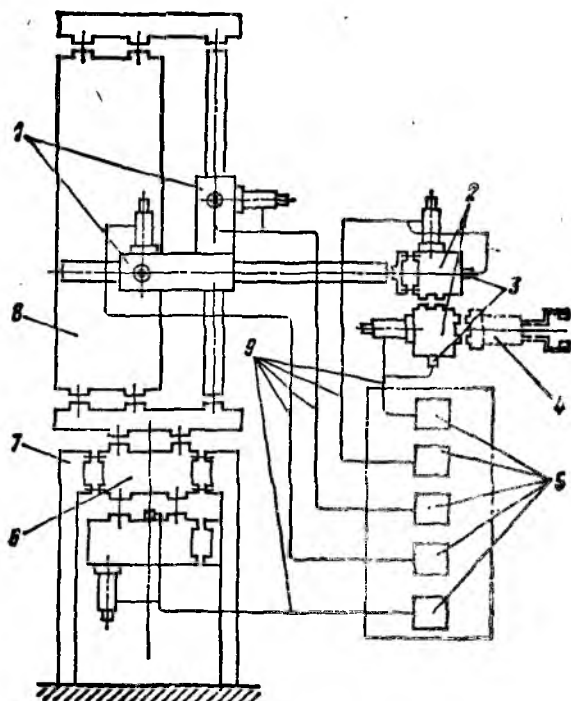


Рис. 7.1. Устройство модульного электромеханического манипулятора промышленного робота типа РЭМ:

1 — поступательный модуль-привод; 2 — вращательный модуль-привод; 3 — информационный модуль; 4 — захватное устройство; 5 — аппаратный модуль; 6 — основание; 7 — кронштейн; 8 — механизм уравнивания; 9 — кабели аппаратных модулей

На рис. 7.1 показано устройство модульного электромеханического манипулятора промышленного робота типа РЭМ. На рис. 7.2 представлен робот РЭМ-5 грузоподъемностью 5 кг, а на рис. 7.3 и рис. 7.4 приведены составляющие его вращательный и поступательный модули.

На рис. 7.5 показано устройство модульного пневматического промышленного робота МП-11 с двумя манипуляторами грузоподъемностью 0,5 кг. Оба робота построены на основе описанной выше системы модулей.

Модульный подход к построению устройств управления роботом. Унификация устройств управления на основе модульного принципа позволяет создать средства управления и контроля для роботов, а также роботизированных технологических комплексов на базе единой системы модулей и унифицированного интерфейса.

Основными принципами создания такой системы модулей являются:

иерархическая структура системы;

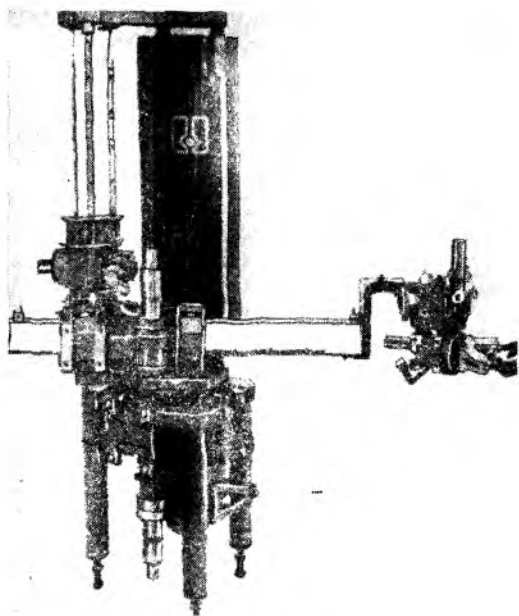


Рис. 7.2. Модульный электромеханический промышленный робот ПРЭМ-6

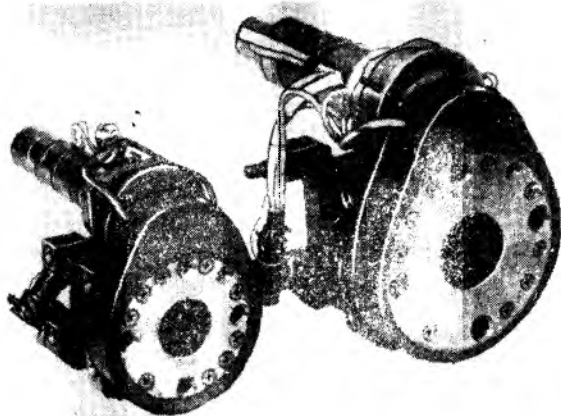


Рис. 7.3. Электромеханические вращательные модули приводы для роботов типа ПРЭМ

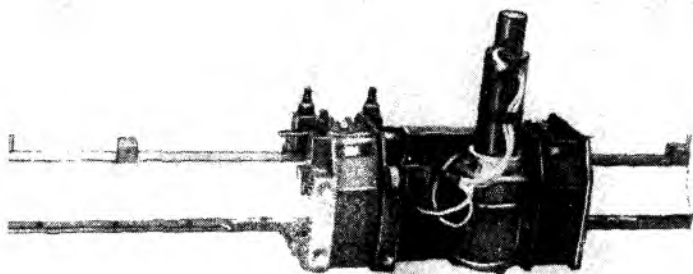


Рис. 7.4. Электромеханический поступательный модуль-привод для роботов типа ПРЭМ

проблемная ориентация модулей на решение задач управления и контроля, присущих роботизированным комплексам;

функциональная ориентация, т. е. специализация модулей для наиболее эффективного выполнения определенных функций;

структурно-логическое соответствие функциональных и конструктивных свойств модулей;

иззамкнутость системы модулей, т. е. возможность наращивать как уровни, так и функциональный набор модулей каждого уровня управления.

Если ограничиться для конкретности электрическими устройствами управления, то под модулем управления понимается электронное устройство, обладающее функциональной, конструктивной

и электрической завершенностью, способное самостоятельно или в совокупности с другими модулями решать задачи управления роботами и роботизированными технологическими комплексами.

Функциональная завершенность модулей характеризует их способность без помощи дополнительных средств реализовать конечное число функций преобразования, обработки и хранения информации. Конструктивная завершенность предполагает выполнение модулей на базе конструктивного элемента из принятого набора конструктивов, а также наличие средств механической фиксации и электрической комму-

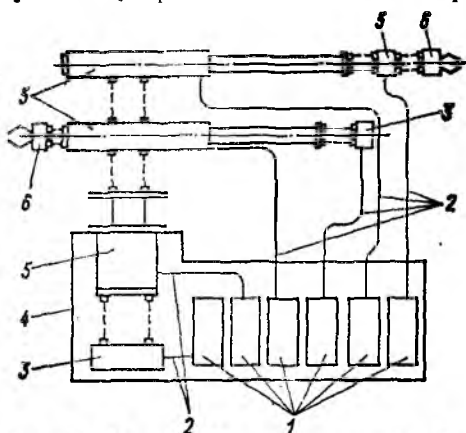


Рис. 7.5. Модульный пневматический промышленный робот МП-11 с двумя манипуляторами грузоподъемностью 0,5 кг:

1 — аппаратурные модули; 2 — кабели аппаратурных модулей; 3 — вращательный модуль-привод; 4 — основание; 5 — поступательный модуль-привод; 6 — захватное устройство

7.3. Система модулей управления

Обозначение модуля	Назначение, характеристика модуля	Применение в устройствах				Количество в устройстве
		цикловых	позиционно-цикловых	позиционных	контурно-позиционных	
МП	Память программ 512×16 разрядов	X	X	X	X	1—8
МУ	Центральное управление, микропрограммный автомат	X	X	X	X	1
МО	Обучение, ручное управление, десятичная индикация	X	X	X	X	1
МИП	Измерение положения. Сравнение восьми каналов, 13 разрядов		X	X	X	1—4
МФК	Позиционное управление, формирование команд управления приводом		X			1—4
МФН	Позиционное управление, формирование непрерывных сигналов управления приводом			X	X	1—4
МДК	Выдача технологических команд, цикловое управление. Регистры, усилители; 16 каналов	X	X	X	X	1—1
МКД	Прием технологических команд, контроль дискретных датчиков; 32 канала	X	X	X	X	1—8
МВК	Входные ключи. Четыре канала	X	X	X	X	0—3
МУС	Усилители постоянного тока. Два канала			X	X	0—1
МК	Контроль работы устройства, индикация неисправностей	X	X	X	X	1—4
МС	Цифровая связь с внешними устройствами (ЭВМ, телеустановкой)	X	X	X	X	1
МИ	Интерполятор-аппроксиматор				X	1
МГУ	Расширитель группового управления до четырех манипуляторов	X	X	X	X	1
МАУ	Адаптивное управление	X	X	X	X	1
ПОИ	Выносной пульт обучения, ручного управления и индикации	X	X	X	X	1

рации для установки их в качестве элемента в конструктивный модуль более высокого уровня. Электрическая завершенность предусматривает в модулях средства электрического сопряжения с модулями определенного класса, а также автономные схемы синхронизации и питания.

В табл. 7.3 дан типовой перечень модулей устройств управления для роботов и роботизированных технологических комплексов. Здесь же в качестве примера приведены наборы модулей, необходимые для укомплектования типовых устройств программного управления (цикловое, позиционно-цикловое, позиционного, контурно-позиционного).

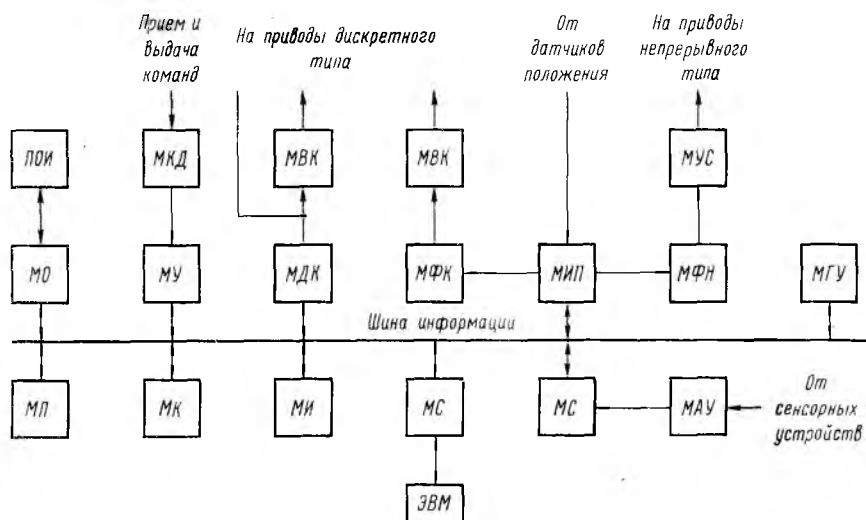


Рис. 7.6. Обобщенная структурная схема системы модулей управления

На рис. 7.6 в упрощенном виде приведена обобщенная структурная схема модульного устройства управления. Как видно из этой схемы, модули управления положением автономны по отношению к центральному управляющему модулю. Функции последнего сводятся к дешифрации команд программы, исполнению команд, формированию программы (условные и безусловные переходы, подсчет числа циклов, выдержки времени и т. д.) и рассылке информации по исполнительным модулям. Такая структура независимо от центрального модуля управления позволяет варьировать типы и способы управления, в том числе с применением различных датчиков положения, а также организовать групповое управление простым увеличением числа исполнительных модулей (с использованием специального модуля-расширителя). Контурно-позиционное управление наиболее просто реализуется добавлением в позиционное устройство интерполятора. Адаптивные датчики с дискретными выходами могут подключаться к стандартным входам дискретных сигналов. Телевизионные и другие устройства, дающие информацию о положении объектов, подключаются через модуль связи к шине информации. Алгоритмы адаптивного управления в простейших случаях могут быть реализованы программным способом, а при необходимости в устройство вводится специальный модуль адаптивного управления.

Система модулей должна обеспечивать, в частности, создание всей гаммы используемых сегодня и перспективных устройств управления, в том числе:

цикловых с управлением «от упора до упора», включая модификации с аналоговыми датчиками положения и увеличенным числом промежуточных точек;

цикловых с управлением по времени;

позиционных для приводов с дискретным управлением;

позиционных для приводов с непрерывным управлением;

комбинированных позиционно-цикловых;

контурно-позиционных для процессов типа сварки;

контурно-позиционных для процессов типа окраски;

с адаптивным управлением.

Элементной базой системы являются микропроцессоры и микро-ЭВМ. Основные модули (модули управления, обработки информации, обучения, контроля) выполняются на микропроцессорах. Модуль обработки информации реализуется как специализированный быстродействующий микропроцессорный узел. Модуль адаптивного управления в зависимости от сложности алгоритмов строится либо на микропроцессорах, либо на микро-ЭВМ с расширенной памятью.

Периферийные модули строятся на дискретных полупроводниковых элементах и отдельных микросхемах СИС и БИС (регистры).

Описанная система модулей реализована ЦНИИ РТК в Единой системе модулей (ЕСМ), на базе которой создан ряд базовых устройств управления для промышленных роботов ЕСМ-020, ЕСМ-030, ЕСМ-040 и др. [25]. На рис. 7.7 показано одно из этих устройств.

Модульное построение систем программного обеспечения. Модульный подход эффективен не только для материальной части роботов и роботизированных комплексов, но и в меньшей степени для создания системы их программного обеспечения. Имея банк унифицированных программных модулей, с помощью специальной программы-генератора СПО можно получать версии СПО, настроенные на конкретную конфигурацию аппаратурных средств роботизированного комплекса.

Система программного обеспечения строится на основе принципов структурного программирования и нисходящего проектирования программ как комплекс взаимодействующих программных модулей. В основу разделения СПО на модули положен функциональный принцип, когда каждый программный модуль выполняет логически завершенную функцию. В случае, когда выполняемая функция является достаточно сложной, такой модуль в свою очередь может быть разбит на несколько модулей более низкого уровня, каждый из которых реализует более простую функцию, являющуюся частью функ



Рис. 7.7. Модульное позиционно-контурное устройство управления ЕСМ-040 для промышленных роботов

ции, выполняемой модулем верхнего уровня. Рассматривая принципы построения СПО, следует различать системы программного обеспечения отдельных роботов (СПО Р) и системы программного обеспечения роботизированных технологических комплексов (СПО РТК).

Структурно все эти системы строятся по иерархическому принципу. В СПО Р в общем случае можно выделить пять уровней, которые описаны в параграфе 5.3 (см. рис. 5.8). Напомним некоторые приведенные там сведения.

Функционально система программного обеспечения делится на две основные части: системное программное обеспечение и прикладное (функциональное) программное обеспечение. Прикладное программное обеспечение предназначено для реализации алгоритмов управления роботом. Системное программное обеспечение служит для организации вычислительных процессов в управляющей ЭВМ.

Необходимость в разработке системного программного обеспечения определяется используемой в системе управления ЭВМ. (Разработку системного программного обеспечения целесообразно вести только в случае невозможности использования или отсутствия стандартной операционной системы, поставляемой вместе с ЭВМ).

Прикладное программное обеспечение СПО Р можно разделить на три группы программ, реализующих алгоритм взаимодействия с основными подсистемами робота: программы обработки сенсорной информации, программы управления исполнительными устройствами и программы связи с человеком-оператором.

Программы обработки сенсорной информации обеспечивают взаимодействие СПО Р с сенсорной системой робота. По внешним информационным каналам этот блок программы получает сенсорную информацию, обрабатывает ее и передает в программы управления исполнительными устройствами и программы связи с оператором.

Программы управления исполнительными устройствами связывают СПО Р с исполнительными устройствами робота. Управляющие воздействия вычисляются в соответствии с инструкциями человека-оператора, поступающими через программы связи с оператором, и на основе данных, получаемых от сенсорных устройств робота.

Программы связи с оператором обеспечивают ввод и трансляцию программ на входном языке, обработку оперативных инструкций оператора и выдачу человеку-оператору сообщений от различных программных модулей. Эта группа программ обеспечивает диалоговый режим работы человека-оператора с роботом.

В качестве примера разбиения СПО Р на программные модули можно привести описанную в параграфе 5.3 систему «Барс», которая реализована для ЭВМ с архитектурой, совместимой с машинами АСВТ-М-6000, М-7000, СМ-1, СМ-2, фирмы «Хьюлетт Паккард» [4]. В число реализованных программных модулей, которые охватывают первые четыре уровня управления, входят следующие модули:

- 1) системные программы:
модуль обработки прерывания,

модуль выбора программ,
модуль работы с таймером,
модуль связи с библиотекой стандартных подпрограмм,
модуль связи с устройствами внешней памяти,
модуль контроля системы;

2) программы обработки сенсорной информации:

модуль опроса датчиков положения,
модуль опроса тактильных датчиков осязания,
модуль опроса локационных датчиков осязания,
модуль опроса системы телевизионного целеуказания,
модуль опроса речевого командного устройства;

3) программы управления исполнительными устройствами:

модуль вычисления управляющих воздействий для манипулятора,
модуль вычисления управляющих воздействий для телекамеры,
модуль управления манипулятором,
модуль управления телекамерой;

4) программы связи с оператором:

модуль ввода операторов,
модуль расшифровки директив,
модуль построения траектории,
модуль вывода сообщений.

В состав системы входит также модуль идентификации объектов, который реализует обработку видеонизображения среды, идентификацию объектов и относится к 5-му уровню управления роботом.

При построении СПО РТК системы управления отдельными роботами в свою очередь образуют 1-й (нижний) уровень управления, а последующие уровни управления определяются постепенным укрупнением объектов управления — управление технологической ячейкой, участком, цехом. Каждый уровень такой системы включает технологическое оборудование с роботами, автоматический склад и автоматическую транспортную систему данного уровня. Поэтому на каждом уровне СПО РТК в соответствии с принятым функциональным принципом разбивания можно выделить следующие основные прикладные программные модули:

- 1) модуль расчета плана загрузки каждой единицы технологического оборудования на заданный период;
- 2) модуль расчета сменно-суточных заданий для технологического оборудования;
- 3) модуль проверки выполнимости сменно-суточного задания;
- 4) модуль управления технологическим оборудованием (число модулей равно числу единиц технологического оборудования, управляемых на данном уровне);
- 5) модуль управления автоматическим складом;
- 6) модуль управления автоматической транспортной системой.

В состав системного управления программного обеспечения СПО РТК помимо операционной системы должна входить система организации файлов на устройствах внешней памяти. Это вызвано необходимостью хранить большие массивы информации, в которых отражаются сведения о плане поставок, технологических маршрутах

изделий, используемом оборудовании, фонде рабочего времени и т. п.

Принятие единых принципов разделения СПО на модули, передачи управления и организации обмена информацией между модулями позволяет существенно повысить производительность труда при создании СПО, улучшить качество разработок и добиться унификации систем программного обеспечения робототехнических систем за счет рационального распределения усилий между организациями-разработчиками, использования ранее разработанных программных модулей в новых разработках и обмена созданными системами программного обеспечения.

Сегодня перспективность модульного принципа в робототехнике общепризнана и он успешно используется всеми ведущими роботостроительными фирмами. В частности, модульными являются показанные на рис. 3.5 и 4.9 промышленные роботы итальянской фирмы «Оливетти» и шведской фирмы «Электролюкс».

Модульные роботы созданы также фирмами «Мицубиси» и «Фанук» (Япония), «Юнимейшен» и «Праб» (США), «Фольксваген» и «Бош» (ФРГ), «Сиакс» (Франция) и др. Аналогичные модульные конструкции разработаны и в странах — членах СЭВ. К ним, например, относятся гидравлические роботы типа «Пирин» (НРБ), электрические сварочные роботы типа ЦИС-995 (ГДР), роботы типа АМ-1 (ЧССР) и типа ПР-02 (ПНР).

В СССР также создан ряд модульных промышленных роботов. Так, в ЭНИМС разработана гамма гидравлических модульных промышленных роботов типа СМ 404300, в ЦНИИ РТК созданы упомянутые выше модульные электромеханические и пневматические роботы (рис. 7.1 и 7.5) и модульные устройства управления для роботов типа ЕСМ (рис. 7.7).

Работа по созданию унифицированных модулей и постепенному переводу на них парка отечественных роботов находится сегодня на стадии отработки и апробирования принципов построения таких модулей и базовых конструкций основанных на них роботов. Помимо научно-технических проблем работа эта связана и со значительными организационными трудностями по обеспечению межотраслевой координации в этой области.

Следующий еще более сложный этап этой работы — унификация модулей роботов в рамках стран — членов СЭВ, развитие международной специализации и кооперации в этой области. Работа эта проводится Советом главных конструкторов по промышленной робототехнике стран — членов СЭВ в соответствии с Генеральным соглашением о многостороннем сотрудничестве по разработке и организации специализированного и кооперированного производства промышленных роботов.

Типажи и ряды роботов и роботизированных технологических комплексов. Объектом следующего уровня унификации после компонентов роботов являются роботы в целом. Унификация роботов основана на разработке их типажа и рядов.

На рис. 7.8 приведена структура типажа роботов. В соответствии с ней в основе типажа лежит технологическое назначение

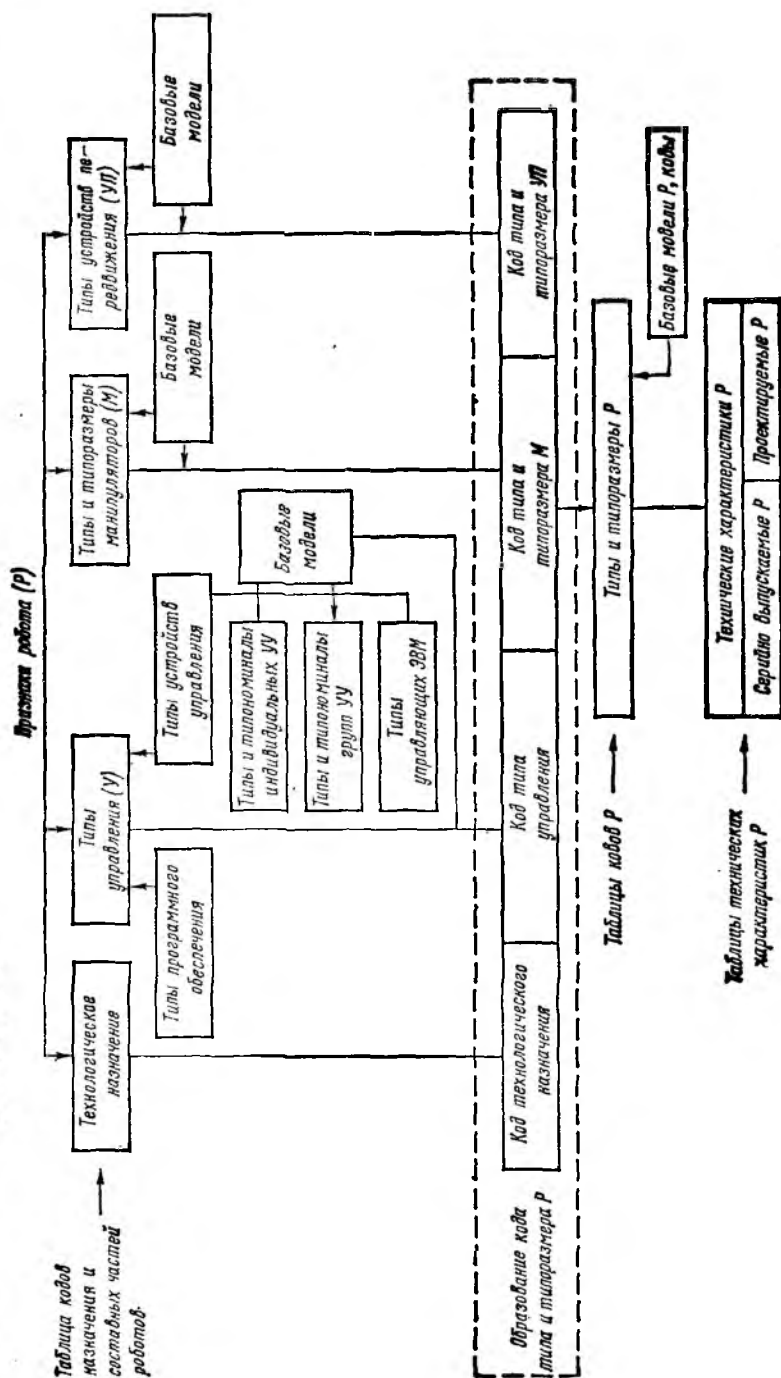


Рис. 7.8. Структура типажа роботов

Признаки типа	Тип привода	А	Электро-механический	Гидрав-лический	Пневма-тический	Комбинированный (электрогидравлический, электропневматический, гидропневматический, гидроэлектрический, пневмоэлектрический, пневмогидравлический)		
	Тип кинематики	Б	Прямоугольная	Цилиндрическая	Сферическая	Угловая (ангулярная)		
	Число степеней подвижности	В	2	3	4	5	6	7 и более

Тип манипулятора →

А	Б	В
---	---	---

Главный параметр	Грузоподъемность, кг	т	Численные значения — по ГОСТ 25204-82
Параметры	Наибольшее перемещение (ход) по степеням подвижности, мм, °	Л, Ф	Численные значения — по ГОСТ 26062-84
	Быстродействие, с, м/с, %с	т, в, ω	
	Погрешность позиционирования, мм	Δ	

Типоразмер манипулятора →

А	Б	В	т	Л, Ф	т, в, ω	Δ
---	---	---	---	------	---------	---

Рис. 7.9. Структура типажа манипуляторов

роботов, поэтому типажи роботов разрабатываются в рамках отдельных отраслей головными организациями соответствующих машиностроительных министерств.

Показанная на рис. 7.8 структура типажа роботов определяется перечнем составляющих работ основных частей — манипуляторов, устройств передвижения и устройств управления. На рис. 7.9 представлена структура типажа манипуляторов роботов. Здесь же приведена последовательность образования типажа и типоразмера манипуляторов.

В основу разработки отраслями типажей роботов положены ГОСТы по грузоподъемности, классификации и номенклатуре основных показателей роботов и другие нормативно-технические документы по робототехнике, разрабатываемые в соответствии с программой Комплексной стандартизации (см. ниже параграф 7.3).

Основой для построения отраслевых типоразмерных рядов роботов являются ряды роботов по грузоподъемности. В табл. 7.4 приведены такие ряды для промышленных роботов. Каждый тип и типоразмер робота представляет собой совокупность типов и типоразмеров основных составных его частей — манипуляторов, устройств передвижения и устройств управления, а также отражают его технологическое назначение.

7.4. Ряды грузоподъемностей промышленных роботов

Тип НТД	Группа ПР по грузоподъемности				
	Сверх- легкие до 1,0 кг	Легкие свыше 1 до 10,0 кг	Средние свыше 10 до 200 кг	Тяжелые свыше 200 до 1000 кг	Сверхтяжелые
ГОСТ 25204—82	0,08; 0,16; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0	1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10	12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200	250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000	Ряд по РТО, ГОСТ 8065—56, начиная с 1250 кг
ОСТы:					
Минстанко- прома	0,02; 0,04; 0,08; 0,16; 0,32; 0,63; 1,0	1,25; 2,5; 5,0; 10	20; 40; 80; 160	250; 1000	2 500; 5 000; 10 000; 40 000
Минэлектро- техпрома	0,2; 0,5; 1,0	2,5; 5,0; 10	25; 40; 63; 80; 100; 125; 160		
Минприбора	0,063; 0,1; 0,25; 0,63; 1,0	1,6; 2,5; 6,3; 10,0	25,0		
Минстрой- дормаша		2,5; 5,0		250	

Каждый тип и типоразмер составной части робота характеризуются совокупностью классификационных показателей и показателей, определяющих технический уровень (см. параграф 3.1).

Объект следующего, третьего, уровня унификации — это роботизированные технологические комплексы. Основным принципом и здесь является модульность. К основному типу модуля в этом случае относятся роботизированные технологические ячейки типа «технологическое оборудование — робот», служащие элементарными гибкими технологическими модулями при создании роботизированных технологических комплексов различного назначения и, в частности, гибких автоматизированных производств.

Одной из главных задач при создании таких типовых ячеек является разработка для них переналаживаемого специального оборудования (накопителей, ориентаторов, межоперационных транспортных устройств и т. д.). Сегодня такие устройства, как правило, создают применительно к конкретным технологическим комплексам без должной унификации и переналаживаемыми. В результате в промышленности они часто оказываются тем узким местом во всем комплексе, которое определяет степень его гибкости в отношении возможности перестройки на выпуск новой продукции, и чаще всего в последнем случае подлежат замене.

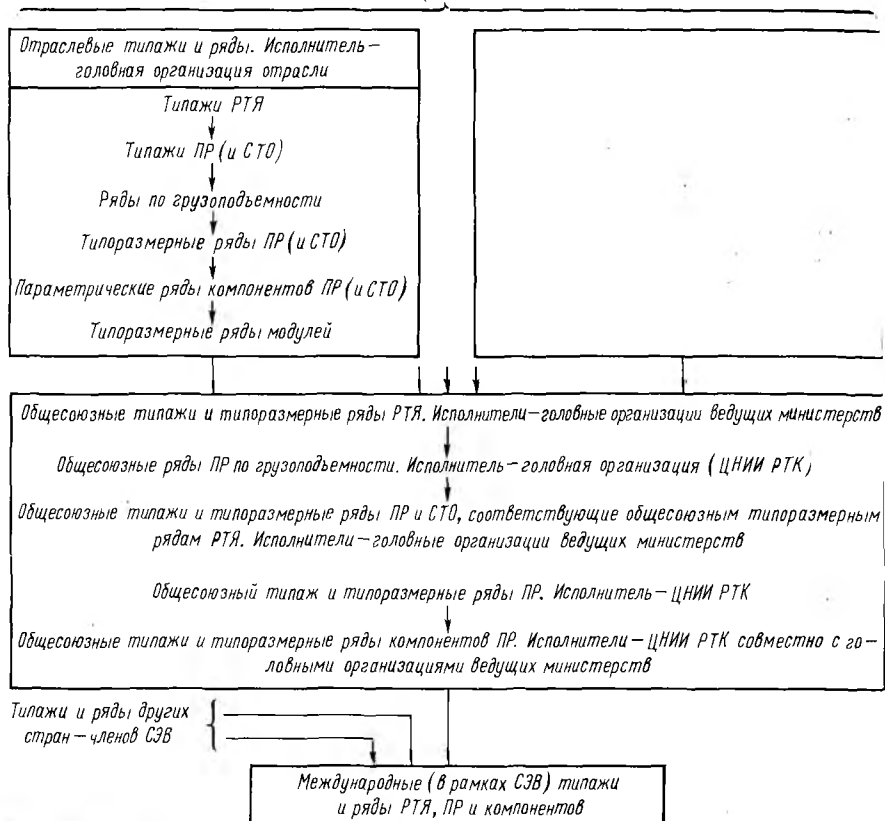


Рис. 7.10. Схема осуществления унификации в промышленной робототехнике:
РТЯ — унифицированная технологическая ячейка; СТО — специальное технологическое
оборудование.

Роботизированным технологическим комплексам посвящены следующие три главы.

На рис. 7.10 дана созодная схема осуществления унификации в области промышленной робототехники.

В целом научно-техническими задачами развития модульного принципа в робототехнике прежде всего являются:

разработка методов оптимизации типов модулей для роботов и роботизированных технологических комплексов;

разработка методов оптимального синтеза из этих модулей роботов и технологических комплексов;

разработка для этого систем автоматизированного проектирования;

разработка наборов конкретных модулей роботов, их устройств управления и роботизированных технологических комплексов;

разработка базовых модульных конструкций промышленных роботов и устройств управления для них;

разработка типовых модульных роботизированных технологических ячеек, в том числе для вновь разрабатываемых и осваиваемых технологических процессов.

Своевременное создание полного комплекса нормативных документов по робототехнике и последовательное развитие модульного принципа проектирования всех средств робототехники обеспечат твердый научно обоснованный фундамент развития отечественного роботостроения.

7.3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Как указывалось выше, основы стандартизации в робототехнике в целом закладываются в настоящее время в области промышленной робототехники. Все работы по этой проблеме в СССР ведутся в соответствии с упомянутой выше Программой комплексной стандартизации промышленных роботов Госстандарта СССР. Эта программа наряду с уже рассмотренными задачами в области унификации охватывает все аспекты проблемы, включая разработку до конца 11-й пятилетки более 50 различных нормативно-технических документов, из которых около половины — ГОСТы, ОСТы, методические указания и технические условия. В состав ГОСТов прежде всего входят уже созданные основополагающие ГОСТы на термины и определения, классификацию, основные показатели, типоразмерные ряды, технические условия, правила техники безопасности. Эти ГОСТы входят в первый уровень нормативно-технических документов, предусмотренных указанной программой. Второй уровень составляют аналогичные документы, относящиеся к компонентам роботов, и, наконец, третий уровень охватывает комплекс нормативно-технических документов, относящихся к применению роботов и к роботизированным технологическим комплексам для всех основных отраслей народного хозяйства, включая машиностроение, металлургию, легкую и пищевую промышленность, сельскохозяйственную промышленность.

Аналогичные работы ведутся в других странах — членах СЭВ и в ряде капиталистических стран (в Японии, США, ФРГ).

Наряду с развитием работ по стандартизации в отдельных странах — членах СЭВ в рамках упомянутого выше Генерального соглашения по робототехнике развернуты работы по международной стандартизации в области промышленной робототехники для всех стран социалистического лагеря. Эта работа также ведется на базе соответствующей общей программы.

8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Задача робототехники наряду с созданием собственно роботов заключается и в создании автоматизированных на их основе процессов различной физической природы, объектов и производств. Соответствующие автоматизированные с помощью роботов комплексы и системы называются роботизированными.

В этой главе рассмотрим роботизированные технологические комплексы (РТК), т. е. комплексы, предназначенные для применения в производстве.

Начнем с их классификации. Для этого будем руководствоваться следующими основными признаками:

- тип роботизированного производственного подразделения;
- степень изменения производства, связанная с созданием данного РТК;
- вид технологического процесса;
- количество выполняемых технологических операций;
- тип и количество используемого основного технологического оборудования;
- тип и количество используемых ПР;
- серийность и номенклатура продукции;
- компоновка комплекса;
- принцип управления комплексом;
- степень участия (функции) человека в комплексе.

В табл. 8.1 представлена общая классификация РТК применительно к машиностроению, основанная на перечисленных выше признаках. Рассмотрим основные типы РТК, перечисленные в табл. 8.1.

Классификация РТК по типу производственного подразделения (табл. 8.1, п. 1). Здесь классификационным признаком, определяющим тип РТК, служит количество выполняемых технологических операций. Соответственно, основным и простейшим типом РТК, который лежит в основе более крупных роботизированных комплексов, вплоть до целых предприятий, является *роботизированная технологическая ячейка* (РТЯ). В ней выполняется всего одна основная технологическая операция (помимо вспомогательных операций). При этом количество единиц технологического оборудования и ПР в составе РТЯ не регламентируется. В частности, в РТЯ может совсем отсутствовать технологическое оборудование помимо ПР, когда основную операцию выполняет непосредственно ПР, или, наоборот, могут отсутствовать само-

8.1. Классификационные признаки и соответствующие им основные типы роботизированных технологических комплексов

№ пп.	Признак	Наименование РТК
1	Тип роботизированного подразделения	Роботизированная технологическая ячейка Роботизированный участок Роботизированная линия Роботизированный цех
2	Степень изменения производства, связанная с созданием данного РТК	Для создаваемого производства: с принципиально новой технологией с новым технологическим оборудованием с новой компоновкой Для модернизируемого производства: с изменением технологии с модернизацией оборудования с изменением компоновки с созданием новых ПР с созданием нового специального технологического оборудования
3	Вид технологического процесса	РТК: механообработки холодной штамповки ковки литья прессования пластмасс термической обработки сварки транспортный контроля и испытаний
4	Тип и количество технологического оборудования	С выполнением основных технологических операций: технологическим оборудованием ПР, комбинацией их
5	Серийность и номенклатура продукции	С определенным размером выпускаемых партий продукции без переналадки комплекса С определенным перечнем видов (типов) выпускаемой продукции
6	Компоновка комплекса	С компоновкой: линейной круговой линейно-круговой по площади объемной

№ пп.	Признак	Наименование РТК
7	Тип управления	С управлением: централизованным децентрализованным комбинированным
8	Участие человека	С участием человека: в выполнении технологических операций основных вспомогательных основных и вспомогательных в управлении комплексом с автоматическим управлением с автоматизированным управлением

стоятельные ПР, когда последние конструктивно объединены с основным технологическим оборудованием.

Следующим более крупным основным роботизированным комплексом является *роботизированный технологический участок (РТУ)*. Он характеризуется тем, что здесь выполняется несколько основных технологических операций, которые объединены технологически, конструктивно (оборудованием) или организационно (управлением). Эти операции могут быть одинаковыми или различными. Если различные операции технологически последовательно связаны, то такой комплекс представляет собой *роботизированную технологическую линию (РТЛ)*. Операции могут быть разными, но не связанными технологически в определенную последовательность, а объединены на участке по другому признаку (например, могут принадлежать к одному виду технологического процесса, выполняться на одном оборудовании и т. п.).

Роботизированный технологический участок не обязательно должен представлять собой совокупность РТЯ и может не иметь их совсем. Например, такой РТУ может включать несколько единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним ПР (неподвижным с размещением оборудования вокруг ПР или подвижным, перемещающимся вдоль ряда единиц оборудования).

В простейший РТУ, где ПР выполняет основную технологическую операцию, например сборку, могут входить несколько ПР, которые последовательно выполняют сборку одного изделия.

Более сложный РТУ включает несколько единиц технологического оборудования и несколько обслуживающих их ПР.

Следующим типом роботизированного комплекса является цех, состоящий, например, из нескольких РТУ. Пределом развития роботизированного производства является комплексно роботизированное предприятие.

В состав участков и цехов помимо технологических ячеек обычно входят еще склады, транспорт (в том числе на базе ПР) и системы контроля качества продукции (см. параграф 8.4).

Классификация РТК по степени изменения производства, связанного с созданием данного РТК (табл. 8.1, п. 2). В соответствии с этим признаком приведенные в п. 2 табл. 8.1 варианты комплексов различаются степенью изменения их основных элементов при создании РТК. Для создаваемых производств, основанных на новой технологии, это изменение, очевидно, максимально, так как разрабатывается заново все основное оборудование, а для действующего производства, автоматизируемого на базе серийных ПР без изменения основного оборудования и компоновки, наоборот минимально.

Классификация РТК по виду роботизируемого технологического процесса (табл. 8.1, п. 3). Приведенные в п. 3 табл. 8.1 варианты РТК для разных видов технологических процессов не исчерпывают перечень последних, а даны как типовые для современного состояния областей применения ПР машиностроении.

Классификация РТК по типу и количеству используемого в нем основного технологического оборудования (табл. 8.1, п. 4). Здесь важно выделить два основных варианта РТК в зависимости от роли ПР в них: в первом случае ПР выполняют основные технологические операции (сборку, сварку, окраску и т. д.), а во втором — вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования.

Классификация РТК по серийности и номенклатуре продукции (табл. 8.1, п. 5). Серийность в данном случае определяется объемом партий продукции, которые можно изготавливать без переналадки комплекса, а номенклатура — широтой перечня выпускаемых видов (типов) продукции. Оба эти показателя имеют существенное влияние на эффективность РТК. В частности, каждый РТК характеризуется предельными значениями этих параметров, вне рамок которых данный комплекс оказывается экономически невыгодным вплоть до целесообразности перехода от гибких комплексов к специальным автоматам (при большой серийности и узкой номенклатуре) или даже к использованию рабочих вместо ПР (в противоположном случае предельно единичного производства).

Классификация РТК по их компоновке, т. е. по размещению технологического оборудования и ПР (табл. 8.1, п. 6). В табл. 8.1 приведены основные (базовые) типы компоновок РТК. При простой линейной компоновке оборудование комплекса располагается в один ряд (по линии), а наиболее сложная объемная компоновка означает его расположение на нескольких этажах.

Классификация РТК по типу управления (табл. 8.1, п. 7). По этому признаку различаются РТК с центра-

лизованным, децентрализованным и комбинированным управлением.

Централизованное управление может осуществляться от стандартной ЭВМ или от специального устройства группового управления.

Децентрализованное управление реализуется с помощью совокупности местных устройств управления, которые связаны друг с другом с целью взаимной координации. Простейшим вариантом такой координации является увязка по времени начала и конца отдельных операций (включая выдачу команд и блокировок). Более сложные формы взаимосвязи осуществляются в функции различных параметров, характеризующих реализуемый технологический процесс.

Комбинированное управление предполагает наряду с централизованным управлением наличие местных устройств управления. Такая система управления может быть одноуровневой, когда сигналы управления, поступающие из центра, и сигналы, вырабатываемые местными устройствами управления, комбинируются на одном уровне, и иерархической (многоуровневой), когда местные устройства управления подчинены центру. При этом число уровней управления увеличивается по мере усложнения комплекса.

Все эти варианты управления РТК могут быть программными и адаптивными как в отношении основного технологического оборудования, так и ПР.

Классификация по степени участия человека в РТК (табл. 8.1, п. 8). Возможны два случая участия человека в работе РТК: во-первых, когда человек непосредственно выполняет некоторые технологические операции — основные или вспомогательные, а во-вторых, когда он участвует в управлении комплексом. В последнем случае, соответственно, такой РТК будет являться не автоматическим, а автоматизированным.

8.2. КОМПОНОВКИ

РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В параграфе 8.1 дана общая классификация роботизированных технологических комплексов, включая участки и цехи. По сравнению с простейшим таким комплексом в виде роботизированной технологической ячейки более крупным роботизированным участкам, линиям и цехам присущи следующие принципиально новые качества. Прежде всего — это необходимость единой транспортно-складской системы и единой системы управления. Эти системы материально и информационно связывают отдельные РТЯ, автоматизированные склады (материалов, заготовок, инструмента, отходов производства, готовой продукции) и другие части комплекса в одну согласованно действующую систему машин. Затем такие крупные комплексы помимо системы динамического управления непосредственно технологическим оборудованием должны включать расположенные над ним уровни иерархии управления, решающие

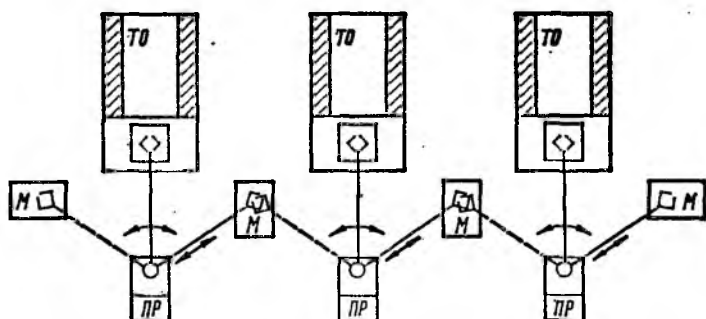


Рис. 8.1. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой:

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

задачи программирования и оперативно-календарного планирования (сменного, суточного, недельного и т. д.).

На рис. 8.1 показан пример простой линейной компоновки однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с непосредственной связью между составляющими линию ячейками. Здесь отсутствует межоперационная транспортная система, а предметы производства передаются от одной ячейки к другой непосредственно входящими в них ПР.

Такие линии с непосредственной жесткой связью между ячейками просты, однако требуется строго определенное взаимное расположение основного технологического оборудования.

На рис. 8.2 показан более сложный вариант линейной компоновки однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки, в которой транспортные связи между составляющими их ячейками осуществляются с помощью специальных транспортных устройств. Это дает возможность территориально развязать отдельные ячейки и тем самым облегчить компоновку всего ком-

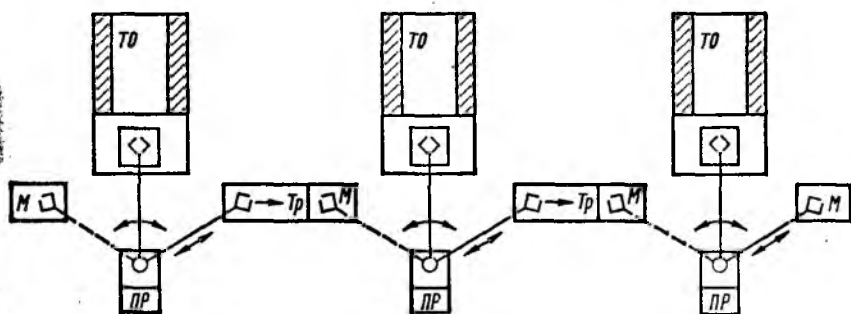


Рис. 8.2. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с транспортным устройством линейной компоновки:

Тр — транспортное устройство

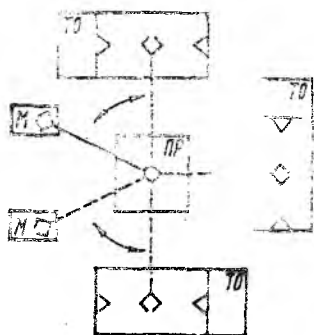


Рис. 8.3. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с круговой компоновкой

На рис. 8.3 показан вариант такого комплекса с круговой компоновкой, в котором один ПР обслуживает три металлорежущих станка, расположенных вокруг:

Другая типовая компоновка линии механообработки с применением подвижного ПР, который может быть напольным или подвесным (перемещающимся, например, по монорельсу), приведена на рис. 8.4

На рис. 8.5 показан пример более сложного построения роботизированного технологического комплекса для цеха механообработки с линейно-круговой компоновкой. По схеме можно проследить последовательность движения предметов производства в комплексе.

В приведенных выше примерах рассматривались комплексы, в которых ПР выполняют вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования. На рис. 8.6 показана схема сборочной линии с линейной компоновкой, где все основные операции возложены на ПР. Транспортное устройство реализовано в виде шагового конвейера, по которому от одного рабочего места к другому перемещаются кассеты с объектами сборки.

На рис. 8.7 представлена схема сборочного цеха, составленного из типовых сборочных линий, показанных на предыдущем рисунке.

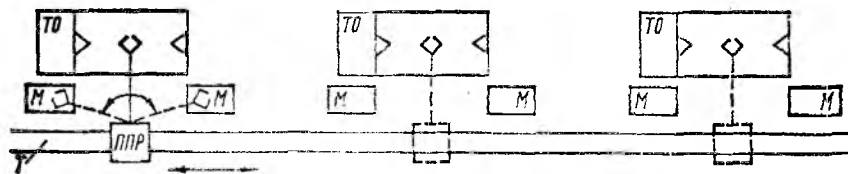


Рис. 8.4. Схема роботизированного технологического участка механической обработки, обслуживаемого подвижным промышленным роботом с линейной компоновкой:

ППР — подвижный промышленный робот; Т — трасса промышленного робота

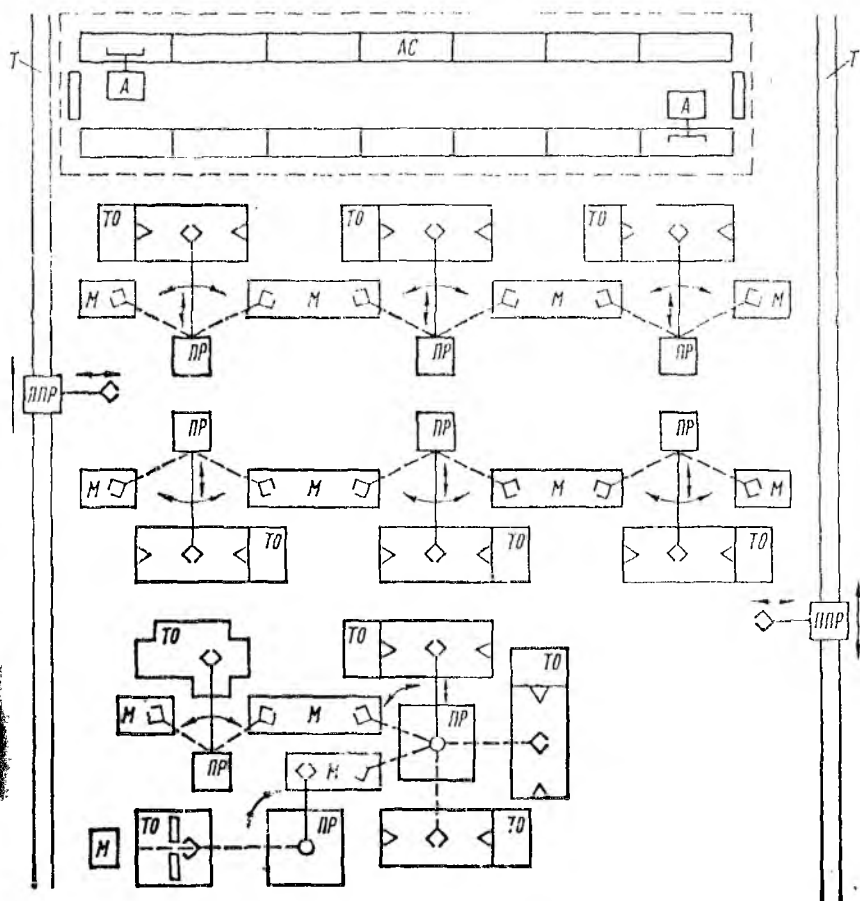


Рис. 8.5. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с компоновкой по площади:

АС — автоматизированный склад с подвижными автооператорами-штабелерами А; Т — трасса транспортной системы с подвижными промышленными роботами ППР

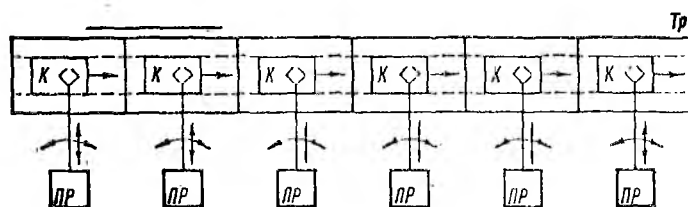


Рис. 8.6. Схема сборочной роботизированной технологической линии с линейной компоновкой:

Тр — шаговый транспортер; К — кассеты

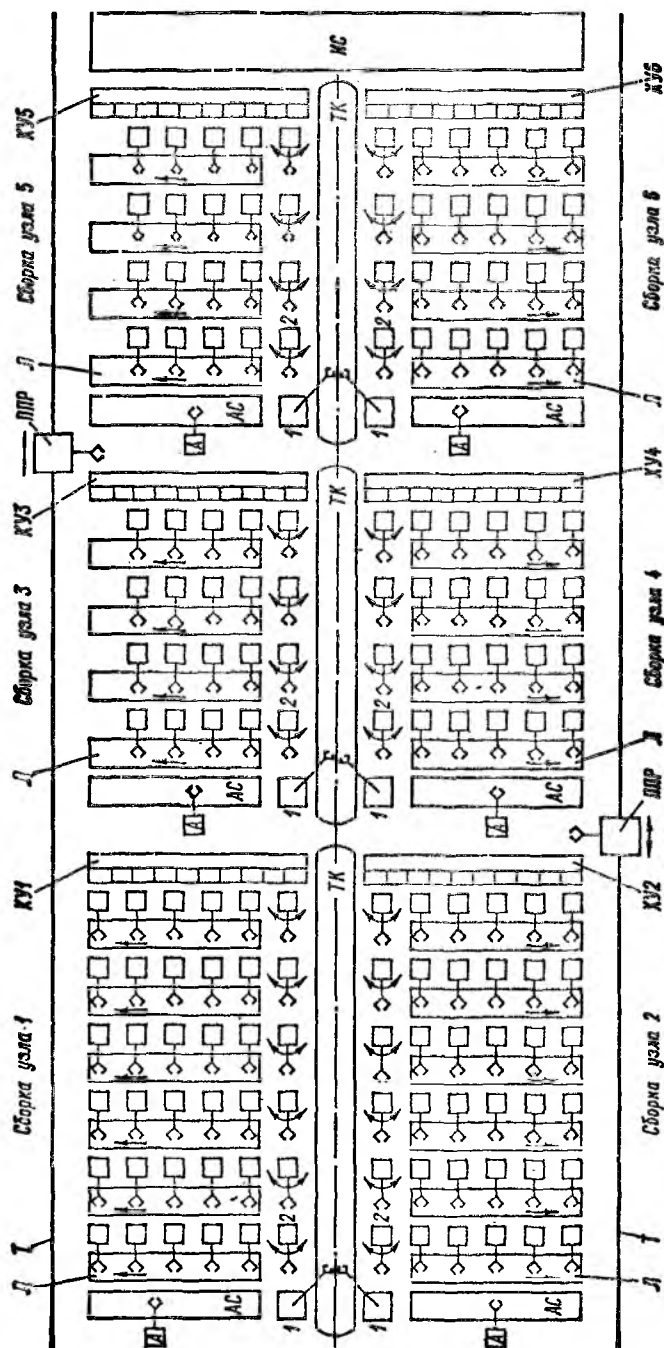


Рис. 8.7. Схема роботизированного сборочного цеха:

Л — роботизированная сборочная линия; КУ1 — КУ6 — контроллер узлов; АС — автоматизированный склад с автоподатчиком; ТК — транспортный конвейер; ПР — ПР для взятия кассет со склада и установки их на конвейер; 2 — ПР для взятия кассет с конвейера и передачи на РТУ сборки; ППР — подвижный ПР на гиресе; Т; НС — испытательная станция.

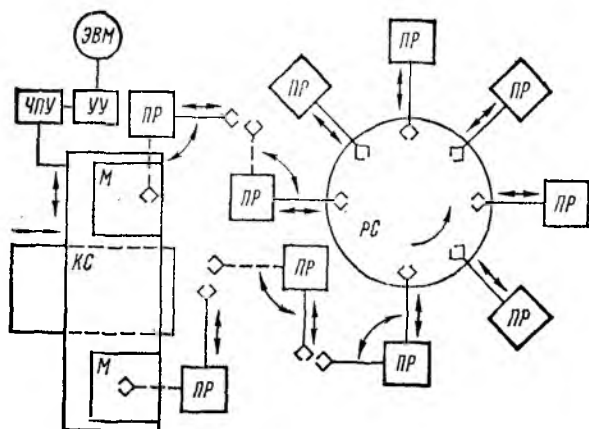


Рис. 8.8. Схема типового роботизированного сборочного участка с круговой компоновкой:

РС — роторный стол; КС — координатный стол; УУ — устройство управления

На рис. 8.8 изображен типовой роботизированный сборочный участок с круговой компоновкой, характерной для приборостроительной и радиоэлектронной промышленности. Схема дана упрощенно, и на ней, в частности, не показаны промежуточные и конечные контрольные операции, обязательные в сборочном производстве.

8.3. УПРАВЛЕНИЕ

РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Все части РТК объединены общей системой автоматического управления. Эта система является иерархической и включает в общем случае достаточно большого комплекса следующие три уровня управления.

Первый уровень образуют системы управления отдельными технологическими ячейками и другим работающим в составе комплекса оборудованием. На этом уровне применяют обычно специальные устройства управления конкретным оборудованием и микро-ЭВМ (типа «Электроника-60» и программно совместимые с ней).

Второй уровень управления — это уровень связывания отдельных частей, включая транспортные системы, в согласованно работающий комплекс. Реализуется этот уровень обычно на стандартных микро- и мини-ЭВМ (типа СМ-4 и программно совместимые с ней). Помимо координации работы всех составных частей РТК на этом уровне часто осуществляются контроль технологических режимов и исправности оборудования, синтез управляющих программ для первого уровня, обработка и передача информации между управляемыми частями РТК, а также следующему, третьему, уровню управления.

Этот третий уровень — уровень оперативно-календарного планирования и контроля. Здесь составляется план производства по объему и номенклатуре на смену, сутки, неделю и т. д. На этом уровне производятся также сводный контроль выполнения плана, учет и анализ простоев оборудования. В состав этого уровня входят, кроме того, системы технической диагностики оборудования и устранения его неисправностей.

Реализуется этот уровень на основе мини-ЭВМ. Все используемые в РТК ЭВМ входят в единую локальную информационно-вычислительную сеть.

Перечисленные три уровня иерархии управления РТК являются основными и могут дополняться промежуточными уровнями. Так, системы управления отдельными технологическими ячейками в свою очередь могут иметь два уровня управления — уровень управления отдельными единицами входящего в ячейку оборудования и уровень совместного управления этим оборудованием в составе ячейки. В крупных комплексах типа цеха, содержащих несколько участков и линий, наряду с системами управления этими участками и линиями имеется следующий над ними уровень координации их работы.

8.4. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В процессе создания РТК можно выделить три следующих основных этапа: технологический, алгоритмический и технический [15].

На первом этапе осуществляется анализ технологического процесса (ТП), в результате чего определяется структура РТК. Функционально технологический этап разработки РТК можно укрупненно представить в виде, приведенном на рис. 8.9. Анализ технологического процесса является одним из наиболее ответственных этапов, от правильности которого в значительной степени зависит эффективность разрабатываемого РТК. В связи с тем, что этот этап включает прежде всего сравнение очень большого числа возможных вариантов размещения оборудования, транспортных путей, важной задачей является его автоматизация, т. е. создание системы автоматизированного проектирования РТК.

Следующий алгоритмический этап разработки РТК наиболее сложный и трудоемкий. Его результатом является определение алгоритмов функционирования всего комплекса и его составных частей, требований к специальным устройствам управления, вспомогательному оборудованию и каналам связи. Функционально алгоритмический этап можно представить в виде, приведенном на рис. 8.10. На этом этапе происходит также увязка с автоматизированной системой управления предприятием.

На этапе алгоритмического проектирования РТК необходимо учитывать следующие требования:

наиболее полное и рациональное использование производственных фондов;

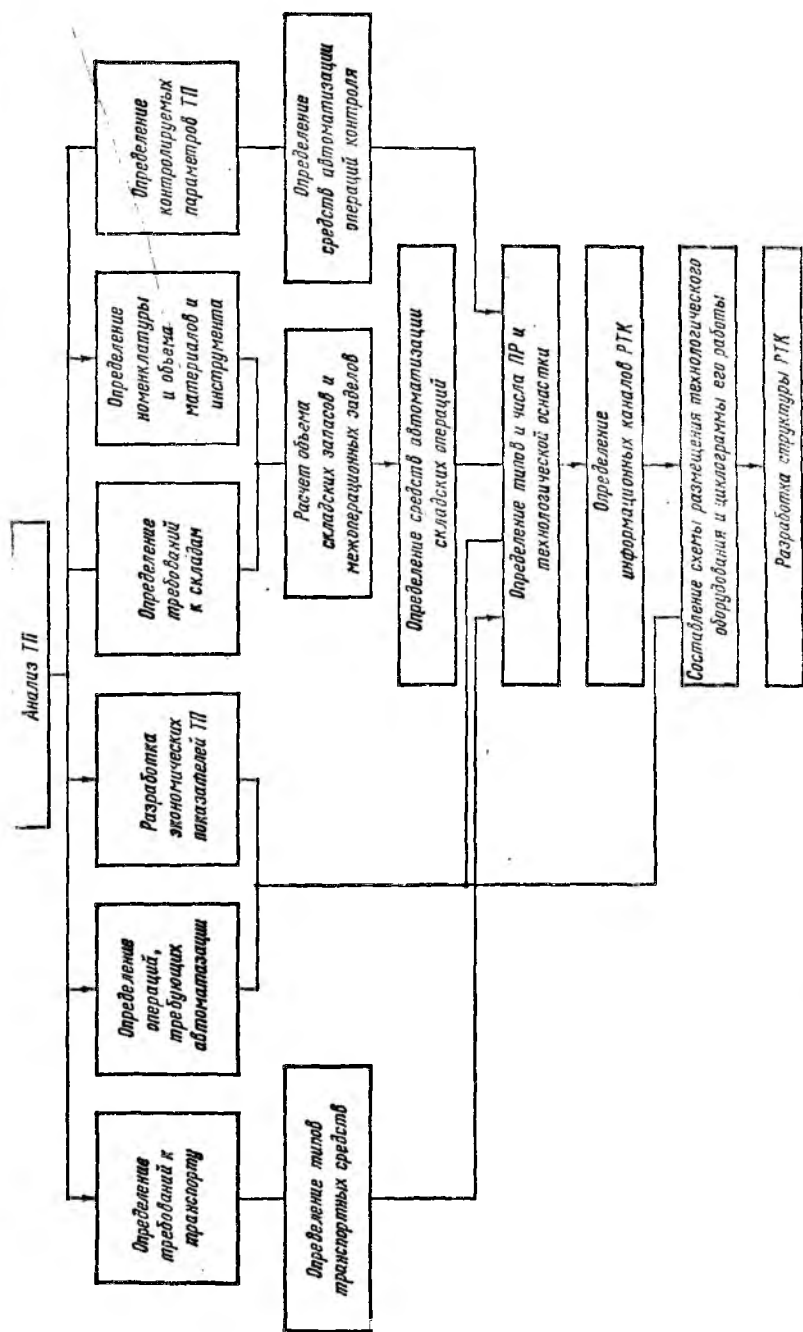


Рис. 8.9. Состав технологического этапа проектирования РТК

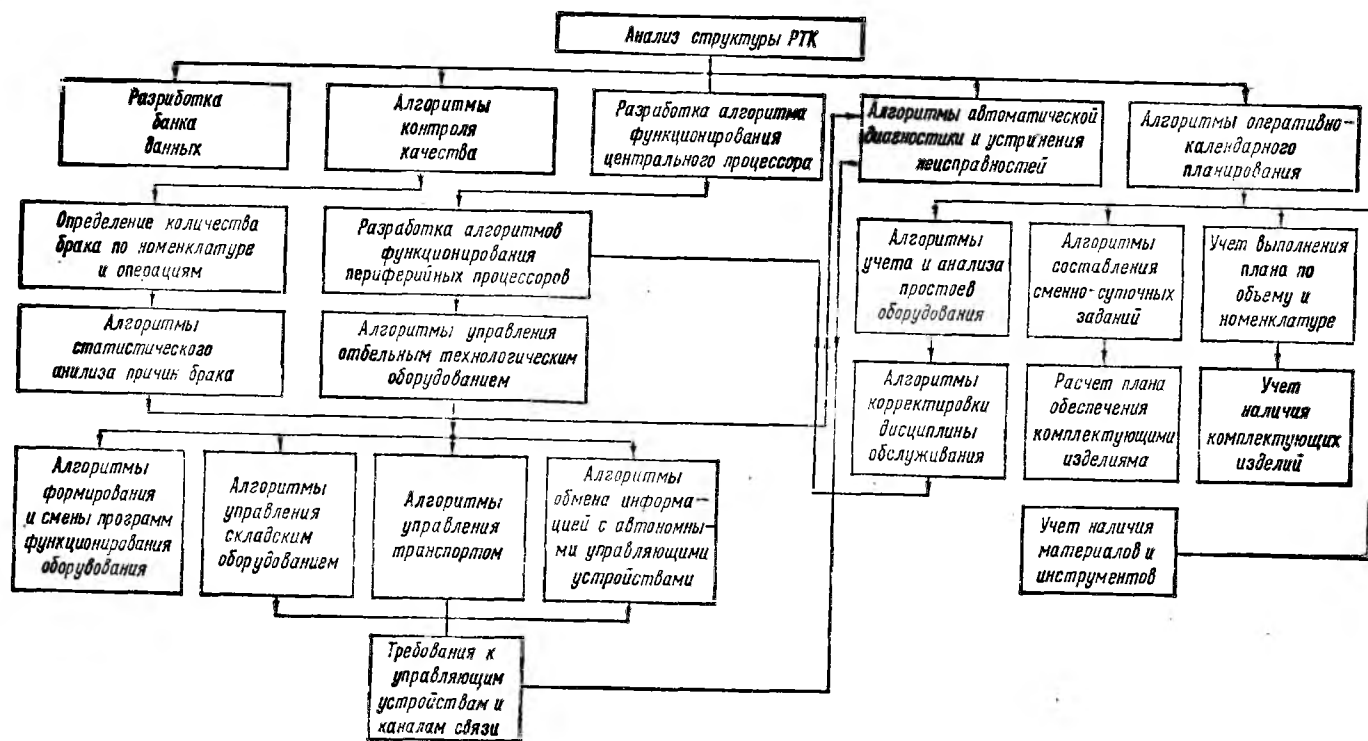


Рис. 8.10. Состав алгоритмического этапа проектирования РТК

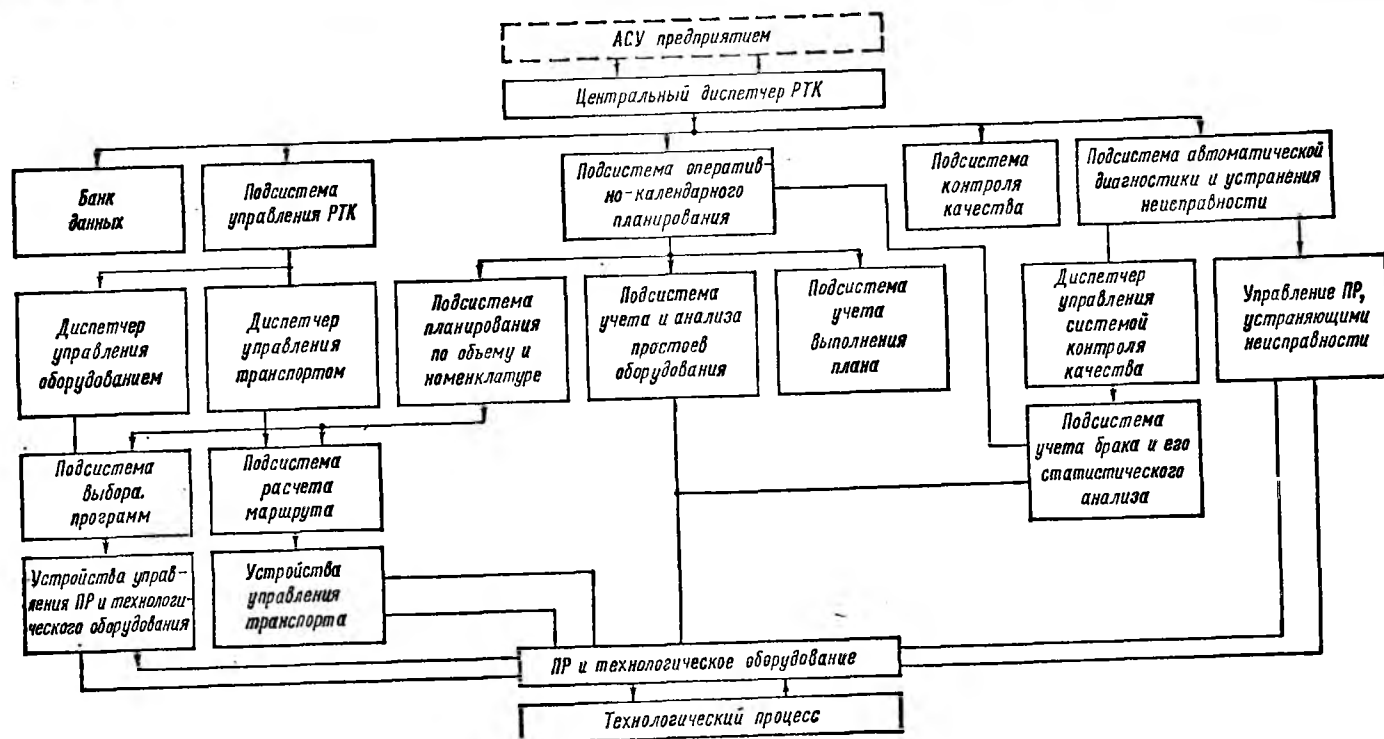


Рис. 8.11. Схема организации управления РТК

возможность корректировки банка данных в ходе выполнения производственной программы;

поэтапность ввода РТК и его частей.

При алгоритмической разработке РТК важным вопросом является обеспечение требований к надежности РТК. Выход какого-либо из устройств РТК не должен влечь за собой остановку всего производственного процесса. Частично для устранения отдельных кратковременных выходов из строя оборудования служат межоперационные заделы, но для полного решения проблемы надежности на стадии алгоритмического проектирования необходимо разрабатывать алгоритмы автоматической диагностики и оперативного устранения неисправностей.

Существенным элементом этого этапа является создание банка данных, содержащего все сведения о типах и характеристиках оборудования, устройств управления, каналов связи и т. д. Причем он должен непрерывно корректироваться и расширяться с включением существующих решений по отдельным элементам РТК и по отдельным роботизированным технологическим операциям. Банк данных должен включать буфер оперативного управления РТК, через который осуществляется обмен данными с АСУ предприятия и в который будут заноситься параметры хода производственного процесса.

На рис. 8.11 приведена типовая функциональная схема организации управления РТК.

Заключительным этапом в процессе проектирования РТК является техническая реализация комплекса. Этот этап включает, в частности, разработку или выбор ПР, их устройств управления, технологической оснастки, транспортных путей и способов транспортировки, каналов связи, устройств информационного обеспечения РТК на основе требований, определенных на предыдущих этапах проектирования. Результатом этого этапа является техническая реализация РТК.

8.5. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ

РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

В задаче создания роботизированных технологических комплексов можно выделить следующие два полярных варианта: реорганизация действующих производств,

создание новых комплексно-автоматизированных производств.

Задача комплексной автоматизации действующих производств имеет принципиальные особенности, затрудняющие ее решение по сравнению с созданием новых роботизированных технологических комплексов. В последнем случае создаваемый комплекс с самого начала проектируют исходя из применения ПР и манипуляторов, включая размещение оборудования, возможность использования специализированных ПР и манипуляторов, поставляемых в комплекте с основным оборудованием, сопряжение систем управления всех составных частей, в том числе роботов, и т. д.

При решении задачи автоматизации уже работающего технологического комплекса необходимо учитывать серьезные ограничения, обусловленные тем, что в этом случае речь идет о модернизации в большей или меньшей степени не приспособленного для применения ПР и манипуляторов технологического процесса и используемого в нем технологического оборудования. При этом обычно не допускается длительная остановка производства.

Основными трудностями при решении этой задачи являются: необходимость размещения ПР и манипуляторов на ограниченных площадях действующего технологического комплекса, включая обеспечение транспортных операций;

необходимость достаточно полного и рационального использования возможностей применения ПР и манипуляторов и их устройств управления, что в значительной степени определяет стоимость и эффективность работы всего комплекса, а также удобство его эксплуатации и надежности;

обеспечение требуемой производительности, т. е., как правило, ее существенного повышения, в том числе за счет соответствующего быстройдействия 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 требуемая грузоподъемность ПР и манипуляторов, поскольку она в основном определяет их размеры, а следовательно, и возможности размещения на рабочем месте вместо высвобождаемого рабочего. В связи с этим при решении вопроса о применении ПР и манипуляторов на действующем производстве следует различать следующие три приведенные в табл. 8.2 основных случая в зависимости от массы объектов, которыми надлежит манипулировать.

Как следует из табл. 8.2, наиболее трудным случаем применения ПР и манипуляторов на действующем производстве является работа с изделиями, масса которых измеряется единицами килограмм (примерно до 25 кг), когда для размещения ПР и манипуляторов необходимо больше места, чем требуется для заменяемых ими рабочих.

Рассмотрим последовательно особенности использования ПР и манипуляторов всех трех категорий грузоподъемности, указанных в табл. 8.2. При этом в рамках каждой из категорий будем различать два основных варианта применения ПР и манипуляторов: на вспомогательных операциях (по обслуживанию основного технологического оборудования) и на основных операциях, выполняемых непосредственно самими ПР или манипуляторами (сборка, сварка, нанесение покрытий и т. д.).

Применение ПР грузоподъемностью до 1 кг. К таким роботам относятся прежде всего отечественные пневматические ПР типов МП-9С, МП-11, МАК-2, «Гном», ММ-063, РКТБ, РП-0,63, РФ. Из них наибольшее применение получили ПР типов МП-9С и РФ-201, 202, 204.

8.2. Особенности применения промышленных роботов и манипуляторов (М) в действующем производстве в зависимости от массы объектов манипулирования

Масса объекта манипулирования	Основная область применения	Занимаемый объем и условия размещения	Типовые решения
Доли килограмма	Приборостроение, легкая промышленность	ПР и М занимают места меньше, чем рабочих, поэтому разместить их на рабочем месте, как правило, несложно	При использовании ПР и М для обслуживания основного оборудования ПР или их отдельные модули размещают непосредственно на этом оборудовании
Единицы килограмм	Основная часть машиностроения	ПР и М занимают больше места, чем рабочих. В связи с этим существует проблема их размещения в пределах действующего рабочего места	Подвесные ПР, в том числе подвижные (на рельсах), модульного построения (с минимальной избыточностью) и вынесенным устройством группового управления
Десятки килограмм и более	Тяжелое машиностроение, транспорт	ПР и М занимают места не больше, чем рабочих вместе с используемыми им специальными средствами механизации для работы с большими грузами	ПР модульного построения, сбалансированные манипуляторы на колонне с ручным управлением

Благодаря небольшим размерам таких ПР задача их размещения на ограниченных производственных площадях в условиях действующих производств, как правило, не вызывает трудностей, а в случае применения ПР на вспомогательных операциях они часто могут быть установлены непосредственно на самом обслуживаемом технологическом оборудовании.

Примером такого решения может служить роботизированная технологическая ячейка листовой холодной штамповки деталей для фотоаппаратов в одном из цехов Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО) (рис. 8.12), где роботы МП-9С установлены непосредственно на станине прессы.

При автоматизации действующего оборудования значительные преимущества дают ПР модульного построения. В рассматриваемой группе ПР к ним относятся МП-11, РФ-202М, МС-1, «Гном», РКТБ. Такие конструкции позволяют укомплектовывать автоматизируемые комплексы роботами с минимальной избыточностью прежде всего по числу манипуляторов и их степеней подвижности. В частности, модульные роботы МП-11 могут компоноваться из десяти конструктивных модулей и иметь в зависимости от требований, предъявляемых технологическим оборудованием, от одной до восьми степеней подвижности, а также один или два независимо работающих манипулятора.

Для аналогичной минимизации структуры устройств управления ПР и оптимального сочетания их с системой управления обслуживаемого

мого основного технологического оборудования эти устройства целесообразно реализовать также на основе модульного построения и группового управления. Так, например, в роботизированном технологическом комплексе сборки контуров для радиоприемника «Ленинград-010» (см. рис. 9.3) переход от индивидуальных устройств управления (типа ЭЦПУ-6030) к устройству группового управления десятью ПР типа МП-9С из унифицированных модулей трех типов позволил уменьшить в девять раз аппаратную избыточность и в три раза программную избыточность. Это обеспечило возможность существенно сократить производственную площадь, упростить эксплуатацию системы управления комплексом, сократить время ее наладки, повысить надежность.

Указанные выше типы ПР обладают хорошим быстродействием, так что при правильной организации автоматизируемых с их помощью технологических комплексов пропускная способность таких РТК определяется не ПР, а основным технологическим оборудованием. Например, на холодной штамповке, где требуется предельная быстрота установки заготовки в штамп, даже с помощью одоманипуляторного робота МП-9С, обеспечивается полный цикл менее 3 с, что дает производительность, выше достигаемой при обслуживании прессы рабочими.

На основных технологических операциях ПР рассматриваемого типа получили применение прежде всего для автоматизации операций сборки (см. гл. 9).

В целом для успешного в широком масштабе решения задачи комплексной автоматизации действующих производств в машиностроении и механообработке на базе ПР грузоподъемностью в несколько сотен грамм на сегодня имеются все необходимые технические и организационные условия, включая значительный опыт эксплуатации такого типа комплексов, в том числе и с адаптивным управлением.

Использование ПР грузоподъемностью в единицы килограмм (до 25 кг). Промышленные роботы такой грузоподъемности занимают промежуточное положение между легкими ПР и ПР грузоподъем-



Рис. 8.12. Роботизированная технологическая ячейка холодной листовой штамповки с пневматическим ПР типа МП-9С

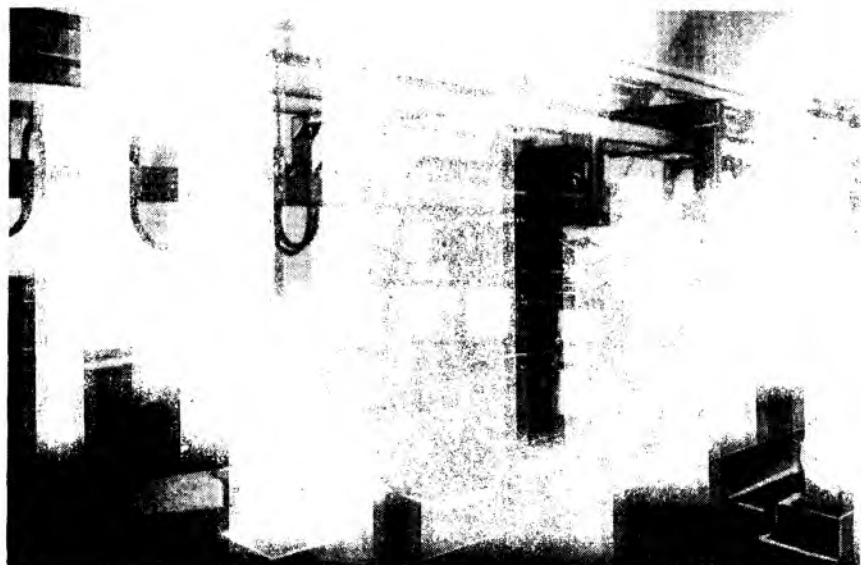


Рис. 8.13. Роботизированный технологический участок металлообработки, состоящий из трех станков и подвижного электромеханического ПР типа МП-1

ностью в десятки и сотни килограмм. Как было указано, при использовании таких ПР важнейшим вопросом является их размещение в условиях действующего производства.

Основным решением, которое в этом случае приемлемо практически почти всегда, является применение подвесных ПР, в частности с размещением их над основным оборудованием, когда ПР выполняют операции по его обслуживанию. Такое решение получило достаточно широкое распространение, например для механообработки. При этом ПР часто делают подвижными, передвигающимися над основным оборудованием по рельсовому пути, что дает возможность обслуживать одним ПР несколько станков.

На рис. 8.13 показан роботизированный участок комплексной механической обработки детали «ступица колеса» компрессора. Основное оборудование участка состоит из токарного полуавтомата модели 1К282, алмазно-расточного станка модели ОС-4508, вертикально-сверлильного станка АС-10 и подвесного электромеханического робота типа МП-1, который обслуживает все три станка, обеспечивая их загрузку и разгрузку, а также транспортирование деталей между ними. Робот размещен над основным оборудованием и перемещается вдоль участка по рельсовому пути.

Аналогичное решение дает использование гидравлических подвижных ПР типов ПРВ-50, СМ 40Ц4301, «Пирин» серии 510 (Болгария). На рис. 8.14 показан участок механической обработки деталей типа «вал» на заводе «Станкоконструкция», состоящий из двух токарных станков с ЧПУ модели 16732ФЗУ и обслуживающего их ПР ЦРВ-50 портального типа.

Наряду с ПР для рассматриваемых целей широкое применение находят сбалансированные манипуляторы с ручным управлением. 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 управлении. Их применение позволяет существенно облегчить условия труда, повысить производительность, а за счет этого сократить и количество рабочих (см. параграф 3.3).

Минимизация избыточности конструкций рассматриваемых ПР имеет, естественно, еще большее значение, чем для легких ПР. Созданы первые типы модульных ПР такой грузоподъемности — пневматический ПР типа МП-8 грузоподъемностью 15 кг (см. рис. 7.5), электромеханические ПР типа ПРЭМ (см. рис. 7.2), РПМ-25 грузоподъемностью 25 кг и МП-12Т грузоподъемностью 15 кг (см. рис. 3.12).

Для этих ПР применяют те же устройства управления, что и для легких ПР.

Быстродействие существующих ПР рассматриваемого типа (кроме случаев обслуживания металлорежущих станков при изготовлении изделий с машинным временем порядка десятка минут) еще недостаточно, поэтому его требуется существенно увеличить с доведением линейных скоростей перемещения захватного устройства до $1,5-2$ м/с. Необходимо также значительно повысить надежность и

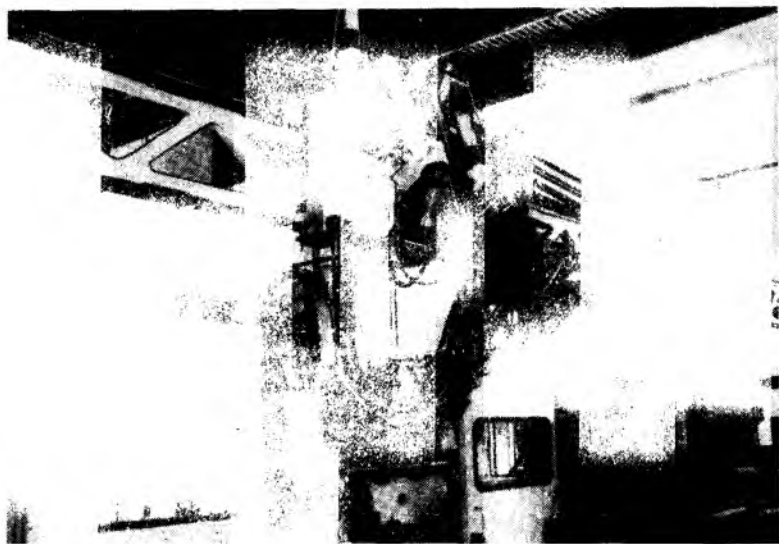


Рис. 8.14. Роботизированный технологический участок металлообработки, состоящий из двух станков и подвижного гидравлического ПР ЦРВ-50

снизить стоимость таких ПР. (Наработка на отказ должна быть не менее 1500 ч, а стоимость — 30—40 тыс. руб.)

Применение ПР и манипуляторов грузоподъемностью десятки килограмм и выше. Как было указано в табл. 8.2, проблема размещения таких ПР и манипуляторов обычно решается проще, чем в предыдущем случае, однако и здесь типовым решением является применение подвесных и подвижных ПР. Успешно используются подвижные напольные ПР типа МП-12Т.

В связи с требуемой большой грузоподъемностью также эффективны сбалансированные манипуляторы с ручным управлением. В настоящее время испытывается определенный недостаток в ПР такой грузоподъемности, исключая чисто транспортные ПР типа ТРТ-1—250 (рис. 3.13), МАК и т. п.

Последовательность и общий порядок организации работ по внедрению ПР и манипуляторов на действующих производствах. Первым этапом этой работы является анализ рабочих мест с позиций возможности и эффективности их автоматизации. По результатам этого анализа должны быть определены последовательность и конкретный план автоматизации обследованного производства в целом. Типовая последовательность при этом такова.

1. Прежде всего принимают во внимание характер выполняемых рабочими ручных операций, во-первых, в отношении безопасности и вредности для здоровья и, во-вторых, их «непрестижности» (где поэтому наблюдается наибольшая текучесть кадров), и, наконец, определяют «узкие места» в части обеспечения рабочей силой, обусловленные различными другими причинами (необходимость трехсменной работы и т. п.).

2. Следующий фактор, который необходимо учитывать, относится к рабочим местам, где ПР и манипуляторы должны выполнять вспомогательные операции по обслуживанию технологического оборудования, — это тип основного оборудования.

В этом отношении приоритет должен быть дан прежде всего автоматическому оборудованию. Сегодня такое оборудование составляет примерно 20 % всего парка страны. Внедрение на этих рабочих местах ПР позволит осуществить их полную комплексную автоматизацию.

После автоматического оборудования комплексной автоматизации на базе ПР подлежит полуавтоматическое оборудование. Применение ПР в этом случае при одновременной доработке оборудования позволяет создать автоматы, весь цикл работы которых, включая вспомогательные операции, выполняется автоматически.

Следующим этапом является применение ПР на основных операциях (прежде всего таких, как сборка, нанесение покрытий, окраска), а также для транспортных и складских работ. Для этого требуется уже полная переработка всего автоматизируемого технологического процесса, а в отдельных случаях и изменение конструкции самого изготавливаемого изделия.

При определении последовательности внедрения ПР и манипуляторов необходимо также учитывать требуемые их типы. Начинать

целесообразно с применения наиболее простых (с цикловым управлением) и легких ПР. Как было указано выше, это не только наиболее простой вариант внедрения ПР в условиях действующего производства, но и требующий, как правило, минимальных затрат.

Наконец, следует принимать во внимание тип автоматизируемого технологического процесса и особенности его организации. В этом отношении на первом этапе работы предпочтение надо отдавать наиболее освоенным с позиций применения ПР и манипуляторов процессам (штамповке, механообработке, окраске, сварке и т. д.). При этом надо ориентироваться на групповое использование ПР путем создания целых комплексно-автоматизированных участков и линий. Это не только повышает эффективность применения ПР, но и существенно облегчает организацию работы. Наиболее эффективно применять ПР на участках, организованных по принципу групповой технологии.

8.6. ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим теперь особенности применения промышленных роботов при создании комплексно-автоматизированных производств. Поскольку речь идет о создании новых производств, в общем случае необходимо предусматривать: разработку новых технологий, использующих принципиально новые возможности, связанные с полным исключением человека из непосредственного участия в производственном процессе и с заменой его роботами; создание нового автоматического технологического оборудования, реализующего эти технологические процессы и предназначенного для работы совместно с промышленными роботами, т. е. в составе роботизированных технологических ячеек; разработку принципов организации и управления такими производствами, необходимой при этом аппаратуры.

Высшей формой комплексной автоматизации производства является создание гибких автоматизированных производств (ГАП). Такие производства позволяют быстро переходить на выпуск новой продукции, осуществлять ее модернизацию, совершенствовать технологию производства в основном путем смены управляющих программ.

Создание и внедрение ГАП представляет собой процесс революционной перестройки народного хозяйства и выходит за рамки робототехники. Однако ПР вместе с микропроцессорной техникой являются важнейшими универсальными компонентами таких производств.

На рис. 8.15 приведен состав ГАП. Как здесь показано, в наиболее полном, завершенном виде такое производство состоит из двух частей:

гибко автоматизированной собственно производственной части, представленной в верхней части рисунка, которая непосредственно реализует технологический процесс изготовления изделий;

систем автоматизированной разработки подлежащих изготовлению изделий (АСНИ, САПР) и технологической подготовки их про-

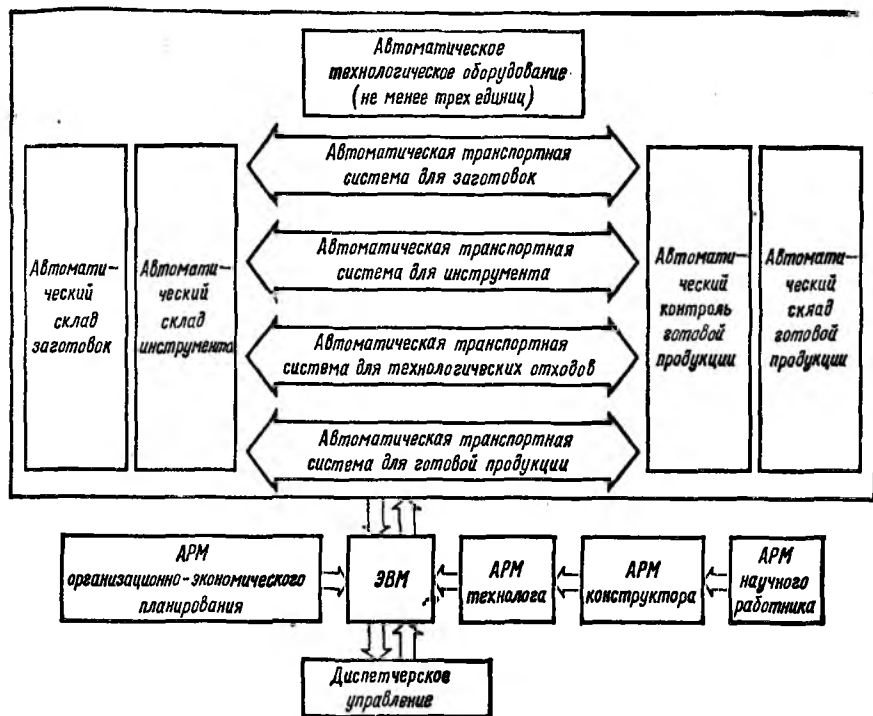


Рис. 8.15. Состав гибкого автоматизированного производства

изводства (АСТПП), реализуемых с помощью показанных в нижней части рисунка автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Эти части объединены общей системой управления АСУ, которая реализуется иерархией ЭВМ.

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 два порядка;

комплексная автоматизация всех частей производства, включая технологические процессы, подготовку производства, разработку конструкторской документации на выпускаемые изделия, планирование и управление производством в целом.

Таким образом, в максимально полном исполнении ГАП на его вход поступают технические задания на очередные изделия, а на выход — готовая продукция. При этом весь процесс может происходить непрерывно круглые сутки без деления на смены, и осуществляется он на основе машинных носителей информации, т. е. без бумажной документации.

Поясним дополнительно первый признак гибкой автоматизации, при формулировке которого по существу дано определение понятия «гибкости» производства как возможности автоматизированного производства изделий сколь угодно малыми партиями.

Прежде всего надо отметить, что имеется в виду не просто мелкосерийное производство и тем более с заранее известным объемом выпуска продукции, а возможность быстрого перехода на изготовление новой продукции в непредвиденный момент, когда это потребуется по различным соображениям. В связи с этим сказанное в равной мере относится к крупносерийному и массовому производствам. (Это означает, в частности, что в ГАП должны быть сведены к минимуму различные производственные запасы.)

В целом понятие «гибкость» можно определить как возможность быстрой реакции производства на следующие внешние и внутренние «возмущения»:

по заданию извне переходить на выпуск новой продукции в пределах заданной номенклатуры путем смены управляющих программ, а при изменении этой номенклатуры — путем изменения состава используемого технологического оборудования;

при выходе из строя отдельных единиц оборудования или других частей производства быстро осуществлять их замену.

Для мелкосерийного производства степень гибкости по отношению к первому ее признаку обычно характеризуется количеством типов изделий, которые изготавливают путем смены только программ. Типичные значения этой величины для современных ГАП механической обработки — десятки типов деталей и сотни их модификаций.

Антиподом ГАП в отношении гибкости являются автоматические линии с так называемой жесткой автоматизацией (рис. 8.16).

Несколько слов о терминологии. Иностранцами аналогами используемого здесь термина ГАП являются ICAM (Integrated Computer-aided Manufacturing) — «интегрированное компьютеризированное (автоматизированное с помощью ЭВМ) производство» и CIM (Computer Integrated Manufacturing).

В американской литературе существуют ставшие уже международными термины CAD (Computer-aided Design), CAM (Computer-aided Manufacturing) и CAI (Computer-aided Inspection), которые соответственно означают автоматизированные с помощью ЭВМ (компьютеризированные) системы конструирования, производства и кон-

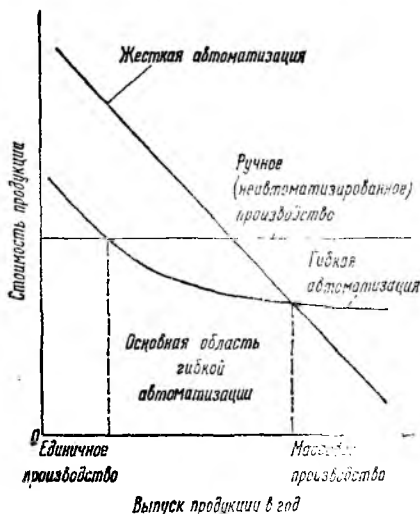


Рис. 8.16. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства

троля качества. Их совокупности, обычно обозначаемые CAD/CAM и далее CAD/CAM/CAI, составляют основу ICAM, т. е. ГАП.

В отечественной литературе применяют также термины: гибкая производственная система (ГПС), гибкий автоматизированный комплекс (ГАК) и т. п. Эти термины аналогичны международному термину Flexible manufacturing system (FMS), и обычно под ними понимают только гибко автоматизированный собственно производственный процесс (верхняя часть рис. 8.15) без включения конструкторско-технологической подготовки производства.

Терминология в области гибкой автоматизации еще не установилась, и термин ГАП используется здесь в качестве синонима приведенного выше понятия «интегрированное автоматизированное производство», включающее системы CAD/CAM/CAI. С учетом изложенного выше под ГАП будем понимать открытую систему, минимальный состав которой соответствует верхней части рис. 8.15 и которая может поэтапно развиваться до полного состава, представленного на этом рисунке.

Период времени, по прошествии которого идея гибкой автоматизации будет полностью реализована в промышленности технически развитых стран, оценивается примерно в 10 лет. Если заглянуть дальше и попытаться предугадать направление развития очередных новых крупных идей, то уже сегодня ясно, что они будут связаны с созданием производств на базе принципиально новых технологий, основанных на безлюдном производстве, т. е. без непосредственного участия человека в технологическом процессе. При этом, во-первых, такие технологии должны обеспечить прежде всего объемное воздействие на объект производства. (Резцы и фрезы дают линейное воздействие, штампы — поверхностное, травление и окрашивание в ваннах — объемное.) Во-вторых, соответствующее принципиально новое технологическое оборудование должно характеризоваться максимальной развязкой технологических воздействий на объект производства от его транспортных движений (оборудование типа роторных линий, сушильных печей и т. п.). Эту перспективу следует учитывать уже на настоящем этапе гибкой автоматизации действующих производств, чтобы вкладывать силы прежде всего в автоматизацию наиболее прогрессивных процессов.

В капиталистических странах с внедрением гибкой автоматизации связываются следующие конкретные выгоды:

- повышение конкурентоспособности продукции (за счет более быстрой сменяемости выпускаемых изделий, повышения их качества, экономии ресурсов и труда);

- рост производительности;

- стабилизация производства и ускорение оборачиваемости капитала;

- повышение эффективности использования рабочей силы;

- создание новых технологических процессов и производств.

Как было указано в параграфе 1.2, на современном этапе развития ГАП в мире созданы первые сотни управляемых от ЭВМ цехов, соответствующих верхней части рис. 8.15. Основным принципом по-

строения таких гибких производств является компоновка их из унифицированных модулей. В соответствии с составом ГАП, показанным на рис. 8.15, основными такими модулями являются технологические (станок-робот, пресс-робот и т. д.), транспортные (в том числе на базе транспортных навесных и напольных роботов), складские, модули контроля качества продукции и технической диагностики оборудования.

Последние модули образуют систему автоматического контроля качества, без которой невозможна автоматическая работа всего производственного 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 осуществляется 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 контрольно-измерительные машины (и прежде всего модульного типа).

Разработки и производство наборов модулей для ГАП ведутся многими фирмами Японии, США, ФРГ, Италии, Англии.

В СССР разработка и комплектные поставки автоматизированных с помощью ПР технологических модулей поручены предприятиям машиностроительных министерств, выпускающим соответствующее технологическое оборудование.

Дальнейшим развитием ГАП, как уже упоминалось, явится дополнение вышеописанных производственных систем типа САМ автоматизированными системами типа САД, т. е. системами научных исследований (АСНИ), проектирования выпускаемых изделий (САПР) и технологической подготовки производства (АСТПП). Эти системы аппаратно реализуются на соответствующих автоматических рабочих местах (АРМ), показанных в нижней части рис. 8.15.

На верхнем уровне иерархии управления подобных интегрированных автоматизированных производств находится система планирования и диспетчерского управления, входящая в АСУ производства. В совокупности АСУ производства — системы АСНИ, САПР, АСТПП обеспечивают полное информационное обеспечение на входе ГАП: АСУ производства — планирование ГАП по номенклатуре и объему производства, АСНИ и САПР — проектирование изделий, АСТПП — разработку технологических процессов. Все эти автоматизированные системы объединены в общую информационно-вычислительную сеть, которая включает в общем случае три уровня ЭВМ.

На нижнем уровне используют микро-ЭВМ типа «Электроника-60» и другие программно совместимые с ней микро-ЭВМ. С их помощью осуществляется управление модулями ГАП. На среднем уровне применяют мини-ЭВМ типа УВК СМ-4 и другие программно совместимые с ними (СМ-1420, «Электроника 100—25» и т. п.). Мини-ЭВМ управляют группами технологических модулей. (В механообработке в сред-

1

нем одной микро-ЭВМ могут быть подчинены до четырех станков с ЧПУ, а эти группы станков в свою очередь подчиняются микро-ЭВМ следующего уровня, которая может объединять в среднем до восьми микро-ЭВМ предыдущего уровня.)

На этом же среднем уровне (микро-ЭВМ) осуществляются хранение программ и другой информации, реализация оперативно-календарного плана, регистрация текущего состояния производства, контроль качества и диагностика неисправности оборудования. (Обычно последние операции ведутся в диалоговом режиме.) На микро-ЭВМ выполнены и АРМ.

Верхний уровень АСУ реализуется на ЭВМ серии ЕС. Вся эта аппаратура соединена локальной сетью связи. Она состоит из заводских линий связи (обычно кабельных), преобразователей, оканчивающихся на нижнем уровне обычно микропроцессорными устройствами управления модулей ГАП, терминалами с дисплеями, а на верхнем уровне — центральной ЭВМ.

Скорость передачи информации в этих сетях требуется обычно не менее 9600 бит/с. (При этом ее значения ввод программы в 32К занимает около 2 мин.) В сети должны быть предусмотрены защита от «несанкционированного доступа» и система выявления и исправления ошибок при передаче информации.

Существенное требование к сети (связанное с обеспечением гибкости ГАП в указанном ранее широком смысле) — иметь возможность изменять программы для оборудования непосредственно во время его работы и также оперативно давать информацию вверх о возможных непредвиденных отклонениях в ходе процесса производства. (Последнее необходимо, в частности, для оперативной замены отказавшего оборудования и устранения других аналогичных неисправностей.)

Помимо обеспечения гибкости ГАП сеть связи позволяет более рационально и полно использовать все технические возможности входящих в ГАП устройств (сенсорных устройств отдельных роботов для управления другими роботами и расширения их возможностей за счет ЭВМ следующих уровней, таким же путем достигаются увеличение памяти роботов и улучшение технической диагностики и т. д.).

Основными задачами при создании верхних уровней управления ГАП, т. е. систем их автоматизированного управления и конструкторско-технологической подготовки производства, являются разработка программного обеспечения и организация соответствующих банков данных.

В целом программное обеспечение ГАП можно разделить на следующие стандартные части: общее программное обеспечение, которое включает операционные системы входящих в ГАП ЭВМ, системы программ для работы с базами данных во внешней памяти этих ЭВМ (так называемые системы управления базами данных — СУБД), программное обеспечение локальной сети связи и специальное программное обеспечение, куда входят системы программ, реализующие алгоритмы управления отдельными модулями ГАП и всего

ГАП в целом, включая планирование и диспетчерское управление.

Общепринятый на сегодня язык программирования для этих целей — Фортран-IV. В дальнейшем предполагается переход на языки Алгол-68 и АДА, которые позволяют прежде всего создавать более надежные программы.

В целом в составе ГАП и аспектах их создания можно выделить следующие основные части:

технологическое обеспечение (на основе групповой организации производства);

программное обеспечение;

основное технологическое оборудование (в составе автоматических технологических модулей — ячеек);

автоматические склады;

автоматический транспорт;

автоматический контроль;

информационно-вычислительная сеть;

автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка производства;

АСУ производства.

К основным этапам создания ГАП относятся:

разработка организационной структуры и технологического процесса;

разработка функциональной, технологической и информационной структур, алгоритмической модели и общей структурной схемы;

определение состава модулей ГАП и выбор оборудования для них;

определение конфигурации локальной информационно-вычислительной сети;

определение перечня задач программного обеспечения ГАП и распределение их по уровням информационно-вычислительной сети;

разработка проектной документации.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, В КОТОРЫХ ПР ВЫПОЛНЯЮТ ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

В соответствии с данной в предыдущей главе классификацией РТК в зависимости от роли в них ПР различаются РТК, в которых ПР выполняют основные технологические операции, и РТК, где ПР осуществляют вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования. В этой главе рассмотрены особенности применения ПР в РТК первого типа. Использованию ПР на вспомогательных операциях посвящена гл. 10.

Как было указано в гл. 1, одной из существенных тенденций в развитии робототехники является устойчивый рост в общем парке ПР доли ПР, применяемых на основных технологических операциях. Начиная с 1980—1981 гг. доля их в наиболее развитых промышленных странах превысила 50 %. Промышленные роботы, выполняющие основные технологические операции, уже не являются средствами автоматизации, а сами выступают в качестве основного технологического оборудования. Опыт показывает, что хотя внедрение ПР на основных операциях требует значительно больших (в три-четыре раза) затрат, чем на вспомогательных операциях, именно здесь достигается наибольшая эффективность применения ПР в отношении высвобождения 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).

Роботизированные технологические комплексы с ПР на основных операциях, реализующих технологический процесс, который выполняется комплексом, классифицируются по виду этих процессов. Соответственно, основными по значению типами таких РТК в машиностроении являются РТК сборки, сварки, нанесения покрытий, шлифования, зачистки, клепки, контроля, транспорта.

Этот перечень может быть продолжен до бесконечности, поскольку он охватывает все основные технологические процессы, требующие выполнения манипуляционных действий, т. е. замены рук человека.

Аналогично в машиностроительных отраслях к этому типу РТК относятся комплексы для бурения в горном деле, монтажа огнеупоров в металлургии, монтажных и облицовочных работ в строительстве, упаковки штучной продукции в легкой и пищевой промышленности, микрохирургии в медицине, геологических работ на дне океана, стрижки овец в животноводстве и т. д.

9.2. СБОРОЧНЫЕ РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Этот тип РТК по своему значению является, пожалуй, наиболее важным. Трудоемкость сборочных операций в машиностроении достигает 40 % общей стоимости изделий, а в приборостроении еще больше — 50—60 %. Вместе с этим степень автоматизации сборочных работ сегодня совершенно незначительна в связи с ограниченными возможностями, которые дают здесь традиционные средства автоматизации в виде узко специальных сборочных автоматов. Такие автоматы применимы главным образом только в массовом производстве, в то время как, например, в машиностроении около 80 % продукции относится к мелкосерийному и серийному производству. Поэтому создание гибких сборочных комплексов на базе ПР является сегодня основным направлением в автоматизации сборочных операций. Так, по прогнозам специалистов к 1990 г. до 50 % всех сборочных работ в автомобилестроении будут выполняться с помощью ПР.

К сборочным операциям относятся механическая сборка, электротехнический монтаж, микроэлектронная сборка. При этом используются такие технологические процессы, как пайка, сварка и скрутка.

Процесс сборки состоит из следующих взаимосвязанных последовательных операций:

- загрузка собираемых деталей в загрузочные и транспортные устройства (обычно при этом с их ориентацией);

- перемещение деталей к месту сборки;

- базирование, т. е. фиксация в строго определенной позиции, и относительная ориентация деталей на сборочной позиции;

- собственно операция сборки, т. е. сопряжения деталей, и часто при этом их закрепление;

- контрольно-измерительные операции в ходе сборки;

- удаление собранного узла со сборочной позиции для перемещения его на следующую сборочную позицию (где должна продолжаться сборка, если она 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 устройства типа толкателей. В других случаях могут применяться специальные ориентиры и простые механические руки.

В целом роль ПР в сборочных комплексах наряду с более простыми и специальными средствами автоматизации может быть различной. Зависит это прежде всего от конкретных требований к гибкости комплекса, что в свою очередь определяется в основном серийностью выпускаемой продукции. Поэтому рассмотрим классификацию автоматических сборочных комплексов в функции объема выпуска продукции от массового производства до единичного и проследим при этом роль в них ПР:

- 1) специальные сборочные автоматы для массового и крупносерийного производства;

2) специализированные перестраиваемые сборочные автоматы для крупносерийного производства.

Строятся такие автоматы обычно по модульному принципу. При этом перестройка на выпуск нового изделия осуществляется за счет изменения состава автомата (с последующей его регулировкой и изменением управляющей программы);

3) специализированные перестраиваемые сборочные автоматы для крупносерийного производства, построенные тоже по модульному принципу с применением простых автоматических манипуляторов на вспомогательных и отдельных основных сборочных операциях;

4) робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства, в которых сборочные операции выполняют специальные (простые) ПР с цикловым управлением;

5) робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства на базе универсальных и специализированных ПР, каждый из которых может осуществлять любые сборочные операции за счет смены инструмента (в том числе непосредственно и в процессе сборки изделия);

6) робототехнические сборочные комплексы для серийного производства, в которых вся сборка выполняется одним сложным универсальным ПР;

7) робототехнические сборочные комплексы для серийного производства с участием человека для управления ПР или выполнения им отдельных операций вручную.

Включение человека непосредственно в технологический процесс сборки может вызываться либо экономическими соображениями, либо технической невозможностью сегодня автоматизировать отдельные особо сложные операции (например, некоторые регулировочные, настроечные и контрольные операции), 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).

Каждый из перечисленных выше типов сборочных комплексов имеет практическое применение в промышленности. Примерами специальных сборочных автоматов, указанных в п. 1, 2 и 3 данной классификации, являются автоматические машины для монтажа печатных плат и сборочные роторные линии, используемые в массовом и крупносерийном производствах. Средства робототехники находят здесь ограниченное применение в основном для их обслуживания на входе и выходе (операции загрузки-выгрузки) [26].

На рис. 9.1 показан робототехнический сборочный комплекс для массового производства наручных часов на базе специальных ПР, относящийся к п. 4 данной выше классификации. На прямоточной транспортной системе закреплено приспособление-спутник, которое перемещается от позиции к позиции по прямой линии с фиксацией через равные промежутки времени.



Рис. 9.1. Робототехнический сборочный комплекс для массового производства наручных часов

Сборка осуществляется на всех позициях одновременно с последующей подачей приспособления-спутника на один шаг через равные промежутки времени по принципу параллельно-последовательной сборки.

Установка оснащена специальными ПР (типов УСО, СГ-126, СГ-130, СГ-137, СГ-212 и др.), предназначенными для выполнения операций со сменой инструмента и приспособлений в зависимости от марки собираемых часов.

В целом сборочный комплекс включает 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 и с необходимой точностью. Чтобы обеспечить условия собираемости, платина часов фиксируется снизу с помощью специального приспособления. Полный цикл работы комплекса — 6—10 с.

Высокая ритмичность работы комплекса и непрерывность выполнения операций позволили повысить производительность (в шесть-восемь раз), качество сборки часов, ликвидировать монотонный ручной труд, поднять культуру и организацию производства. В настоящее время на отечественных часовых заводах работают десятки подобных комплексов в виде комплексно-автоматизированных сборочных цехов. Первый такой цех был создан на Петродворцовом

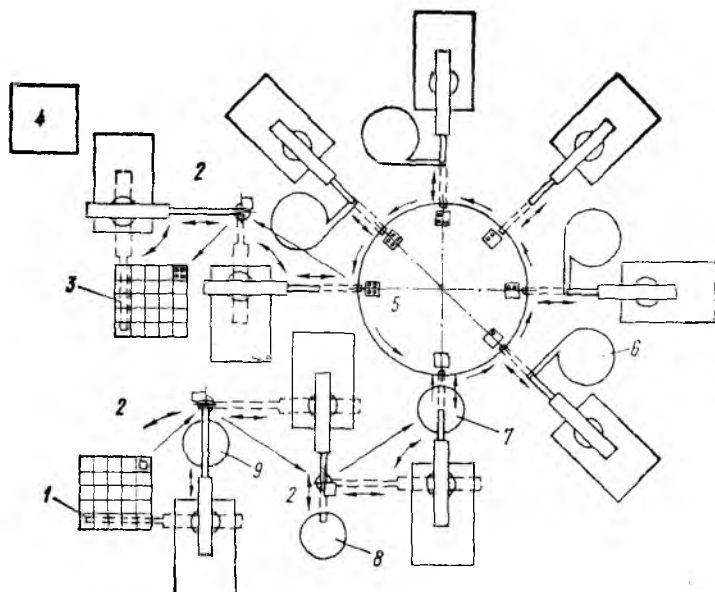


Рис. 9.2. Робототехнический комплекс для сборки контурных катушек радиоприемников:

1 — загрузочное устройство (тара); 2 — промежуточная точка; 3 — разгрузочное устройство; 4 — устройство группового управления; 5 — роторный стол; 6 — загрузочное устройство; 7 — ванна для очистки; 8 — ванна для пайки; 9 — ванна для флюсования

часовом заводе под Ленинградом, где установлено 50 таких комплексов с общим числом ПР более 170 шт. В результате здесь высвобождено около 500 работников.

На рис. 9.2 показан пример сборочного робототехнического комплекса, построенного на базе универсального ПР (п. 5 классификации). Комплекс включает несущую раму, поворотный стол, загрузочные и ориентирующие устройства, устройства крепления оснащения, кабельные узлы, устройство управления комплексом, блоки синхронизации и связи с ЭВМ. Для выполнения собственно операций сборки применяют универсальные ПР типа МП-9С (см. рис. 4.3).

Комплекс предназначен для сборки контурных катушек бытового радиоприемника высшего класса, где ПР выполняют следующие операции:

- выборку каркасов катушек и кассеты;
- флюсование выводов с укрепленными концами обмоток;
- пайку выводов;
- промывку выводов после мойки в специальном растворе;
- установку каркасов на ложементы поворотного стола;
- надевание кольца;
- навинчивание бусы;
- закручивание сердечника;
- надевание экрана;

маркировку катушки;

установку в кассеты готовой контурной катушки.

Смена кассет на рабочих позициях автоматизирована с помощью разгрузочно-загрузочных устройств. Сборочные единицы подаются на рабочие позиции при помощи вибробункеров, где происходят их ориентация, накопление и поштучная выдача.

Для обеспечения условий собираемости и снижения требований к точности изготовления сборочных элементов, оснастки и приспособлений манипуляторы ряда ПР оснащены вибромодулями, создающими вибрацию с частотой 50 Гц и обеспечивающими движение этих элементов по оптимальным траекториям кривых 2-го порядка. За один рабочий цикл выполняются все технологические операции десяти ПР по принципу параллельно-последовательной сборки.

В конце цикла происходит перемещение координатного устройства, которое подает в позицию захвата первого ПР и в позицию сброса десятого ПР соответствующие ячейки подающей и приемной кассет, а также перемещение на один шаг поворотного стола, на специальных ложементах которого производится сборка контурной катушки. Длительность цикла работы комплекса — 10 с.

Применение подобных сборочных комплексов повышает производительность труда в среднем в 15 раз, дает экономию производственной площади и позволяет осуществить комплексную автоматизацию сборочного производства в целом.

На трех таких комплексах собирают 2,5 млн. штук контурных катушек в год 42 наименований, различающихся по конструктивным элементам, электрическим и магнитным параметрам.

Переналадка комплекса осуществляется заменой рабочих органов ПР и изменением их управляющих программ.

По сравнению с предыдущим типом сборочных комплексов, основанных на использовании специальных ПР, применение здесь на всех операциях одного типа универсального ПР расширяет номенклатуру собираемых изделий, хотя сами ПР при этом оказываются более сложными и избыточными по своим возможностям применительно к каждой отдельной выполняемой ими операции. Поэтому переход от специальных ПР к универсальным оказывается оправданным и необходимым с уменьшением серийности выпускаемых изделий.

На рис. 9.3 показан участок автоматизированного сборочного производства, включающий три сборочных комплекса, автоматы намотки катушек и автоматическую транспортно-складскую систему. Мини-ЭВМ осуществляет изменение программы работы оборудования участка, а также диспетчерование и оптимизацию загрузки оборудования на основании плана поставок и располагаемых материальных ресурсов.

На рис. 9.4 представлена схема линии автоматической сборки трансформаторов на базе ПР с элементами очувствления и адаптивным управлением. На несущей раме смонтировано сборочное оборудование — три ПР, питатели собираемых деталей и сборочная оснастка. В линию входят также установка формовки и сушки трансформаторов и ряд других элементов.

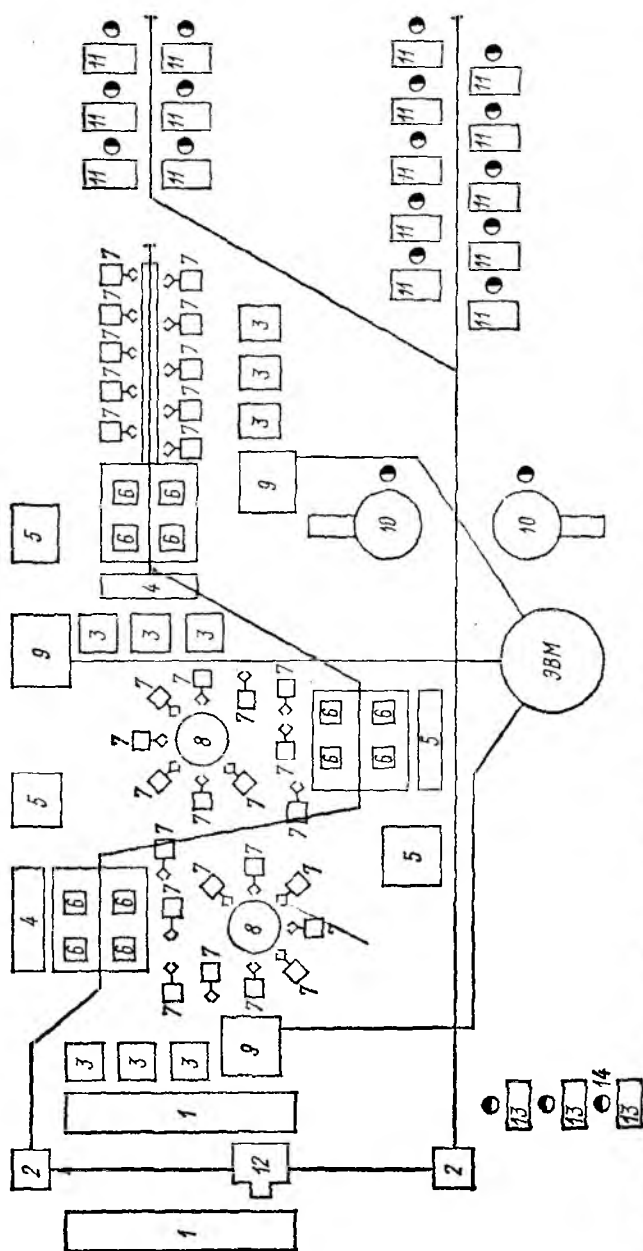


Рис. 9.3. Роботизированный участок намотки и сборки контурных катушек радиоприсоединений:

1 — стеллажно-тарный автоматизированный склад СТАС; 2 — площадка для загрузки-разгрузки СТАС; 3 — устройство управления роботами; 4 — координатный стол; 5 — устройство ЧПУ; 6 — устройство загрузки-разгрузки; 7 — промышленный робот МП-9С; 8 — РТК сборка контурных катушек; 9 — устройство управления РТК сборки; 10 — намоточный полуавтомат; 11 — стол с намоточным станком; 12 — подвесной транспортный робот; 13 — контрольный стол; 14 — рабочая

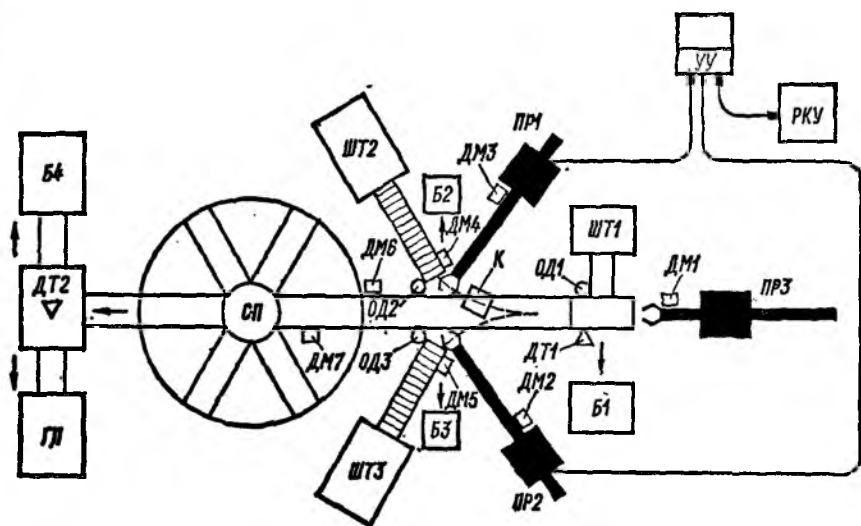


Рис. 9.4. Линия автоматической сборки трансформаторов на базе ПР с адаптивным управлением:

ПР1—ПР3 — промышленные роботы; СП — сушильная печь; ШТ1—ШТ3 — шаговые транспортеры (питатели) для подачи соответственно нижних магнитопроводов, верхних магнитопроводов и катушек; Б1—Б4 — бункеры для брака; П — бункер для готовой продукции; ДМ1—ДМ7 — магнитные датчики; ДТ1, ДТ2 — датчики тока; ОД1—ОД3 — оптические дальномеры; УУ — устройство управления комплекса; РКУ — речевое командное устройство

Устройство управления линии осуществляет управление ПР и другим технологическим оборудованием по заданной программе. Кроме того, в него включен узел адаптации, состоящий из тактильного сенсора и системы контроля тока холостого хода трансформатора. Набор вспомогательных программ позволяет контролировать качество сборки трансформаторов и принимать решение о дальнейшем порядке работы в зависимости от полученной информации.

Роботы реагируют на нестандартные ситуации, которые могут складываться во время работы:

невыполнение одного из условий собираемости узла,

несоответствие магнитных и электрических параметров заданным.

Линия работает по принципу последовательной сборки следующим образом. При поступлении нижней пары магнитных сердечников с питателя на исходную позицию сборки подается команда на ПР, который берет катушку из питателя и устанавливает ее на пару сердечников. Другой ПР берет с исходной позиции питателя два верхних магнитных сердечника, последовательно опускает их в обезжиривающий и клеевой растворы, а затем соединяет с катушкой и двумя нижними сердечниками. Третий ПР удаляет собранный трансформатор с позиции сборки и с одновременным разворотом подает в установку формовки и сушки карусельного типа. В установке трансформаторы обжимаются и подогреваются для склейки торцов сердечников.

В процессе сборки трансформаторов контролируются: поступление деталей на исходные позиции (оптические датчики) собираемость деталей и узлов (датчики положения), электрические параметры магнитопривода (датчики тока).

После окончания формовки и сушки трансформатора осуществляется выходной контроль его электрических параметров. В случае невыполнения одного из условий ПР бракуют детали или узлы и сбрасывают их в браковочную тару.

Технико-экономические показатели линии следующие:

Число выполняемых команд	40
Количество контролируемых параметров	3
» » положений механизмов	34
Полный цикл сборки трансформаторов, с	2—5

Следующим типом робототехнических сборочных комплексов, которые оказываются экономически более выгодными при меньшей серийности производства, являются комплексы с ПР, последовательно выполняющими ряд сборочных операций на одном рабочем месте вплоть до полной сборки целого изделия (п. 7 данной выше классификации). Такое построение комплекса существенно повышает его гибкость, позволяя чисто программно изменять число сборочных операций без изменения числа ПР, что неизбежно, если каждый ПР выполняет только одну операцию. В таких комплексах ПР в ходе сборки многократно сменяет свои рабочие органы при переходе от одной операции к другой. Это также повышает гибкость комплексов.

Примерами сборочных ПР, предназначенных для такой многооперационной сборки, являются электромеханические ПР типа «Сигма» (Италия), «Пума» (США), «Скилам» (Япония). На рис. 3.5 показан ПР «Сигма». Это модульный электромеханический ПР, в котором могут быть предусмотрены от одного до четырех манипуляторов, работающих в прямоугольной системе координат и имеющих до восьми степеней подвижности. (На рис. 3.5 ПР снабжен двумя манипуляторами.) Манипуляторы могут передвигаться вдоль станины ПР по двум направляющим и имеют шаговые приводы, сменные рабочие органы и датчики усилий, которые необходимы при выполнении механической сборки.

Управление ПР — от мини-ЭВМ. Ввод программ осуществляется через телетайп или методом обучения. Промышленные роботы «Сигма» используют на сборке печатных плат, штепсельных колодок, узлов пишущих машинок, клапанов и т. п. Имеются модификации этого ПР для выполнения плазменной резки, горячей клепки, сверловочных работ.

На рис. 9.5 показан робототехнический комплекс для сборки пылесосов фирмы «Хитачи» (Япония). Комплекс смонтирован на сборочном столе и включает два электромеханических манипулятора (1, 5) с восьмью степенями подвижности, один из которых (силовой) работает в вертикальной плоскости, а второй (очувствленный) — в горизонтальной, семь телевизионных камер. Три из них (α , β , γ)

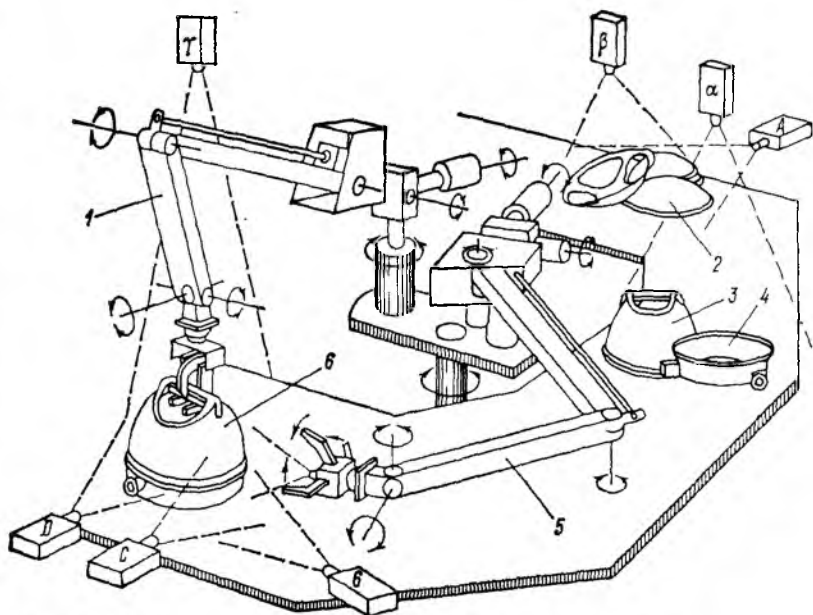


Рис. 9.5. Робототехнический комплекс для сборки пылесосов

ориентированы вертикально, а четыре (A, B, C, D) — горизонтально.

Захватное устройство очувствленного манипулятора снабжено датчиками усилия, давления и тактильными. Пылесос 6 собирается из трех узлов: фильтра 2, электродвигателя 3 и корпуса 4, которые поступают на сборку неориентированными (навалом).

9.3. СВАРОЧНЫЕ РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Сварка — одна из областей широкого использования ПР. Из многочисленных видов сварки ПР получили основное применение на контактной точечной, дуговой, а также на электронно-лучевой сварке.

Контактная точечная сварка осуществляется путем нагрева импульсным электрическим током. Рабочими органами ПР, предназначенных для выполнения такой операции, являются сварочные клещи (рис. 9.6). Однако существуют сварочные ПР, у которых манипулятор заканчивается одним электродом, а вторым электродом служит само свариваемое изделие (рис. 9.7). 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 (с целью максимально сократить длину кабеля от трансформатора к сварочным клещам, по

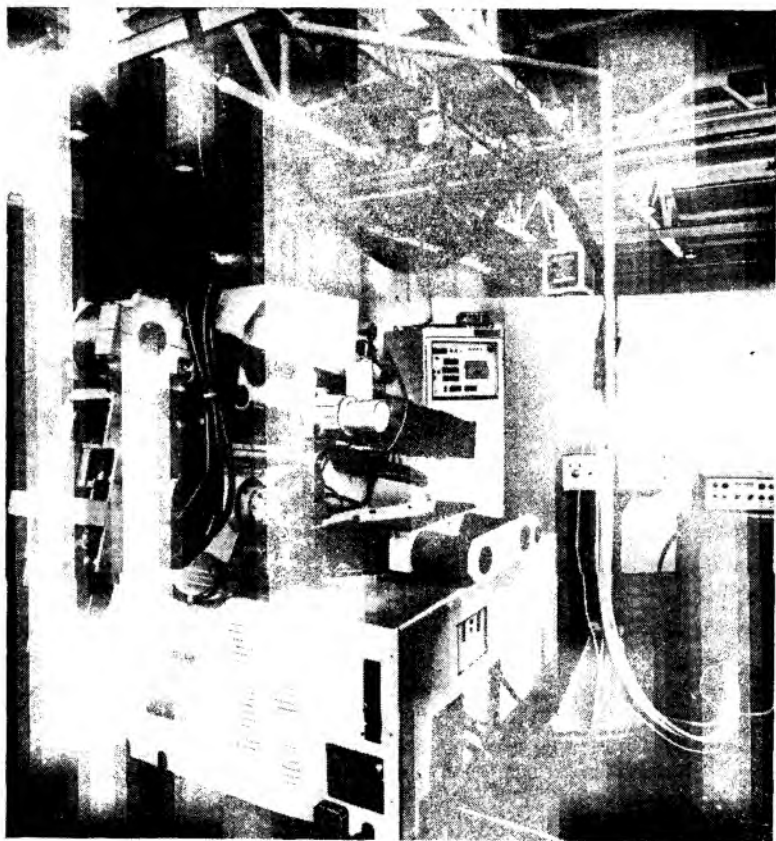


Рис. 9.6. Промышленный робот «Универсал-6»

которым проходит большой импульсный сварочный ток). Грузоподъемность таких сварочных ПР обычно составляет 20—30 кг.

Управление ПР для контактной точечной сварки позиционное. Устройство управления должно быть рассчитано на работу в условиях сильных электромагнитных помех, создаваемых импульсами сварочного тока.

Наиболее широко контактная точечная сварка с помощью ПР применяется в автомобилестроении (сварка кузовов), судостроении, вагоностроении, строительстве. На рис. 9.8 показан участок сварки кузовов автомобилей с помощью ПР.

Дуговая сварка — значительно более сложный процесс, чем контактная точечная. Здесь требуется осуществлять непрерывное перемещение сварочного электрода с определенной скоростью по сложной траектории вдоль свариваемого шва с одновременным поперечным перемещением для создания шва нужной толщины. Электрод при этом должен сохранять определенную ориентацию по отношению к пло-

скости шва. Грузоподъемность ПР для дуговой сварки меньше, чем ПР для контактной точечной, и не превышает 5—8 кг.

Промышленный робот для дуговой сварки часто комплектуется еще столом с несколькими степенями подвижности по углу для размещения на нем свариваемых изделий и манипулирования ими перед ПР.

В функции устройства управления ПР для дуговой сварки помимо управления движениями входит еще регулирование параметров режима сварки (тока, напряжения дуги, притока газа и т. д.). Управление при этом должно быть адаптивным. Основные задачи адаптации следующие: поиск начала шва, слежение за кромками свариваемых деталей с учетом также возможной кривизны их поверхностей, ориентация электрода в пространстве. Кроме того, адаптация требуется при регулировании технологических параметров собственно процесса сварки с учетом состояния внешней среды, а также при обязательном контроле качества шва.

Для контроля положения электродов относительно кромок свариваемых деталей применяют контактные и магнитные датчики, ультразвуковые и оптические дальномеры, телевизионные системы.

На рис. 9.9 показан робототехнический комплекс для дуговой сварки с угловой системой координат в комплекте с манипуляционным столом — так называемый сварочный центр, а на рис. 9.10 представлен промышленный робот портального типа с прямоугольной системой координат.

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 манипуляторов здесь манипулирование производится электронным лучом с помощью отклоняющего магнитного или электрического поля. (Хотя существуют установки и с перемещением стола, на котором крепятся свариваемые детали.) Управление

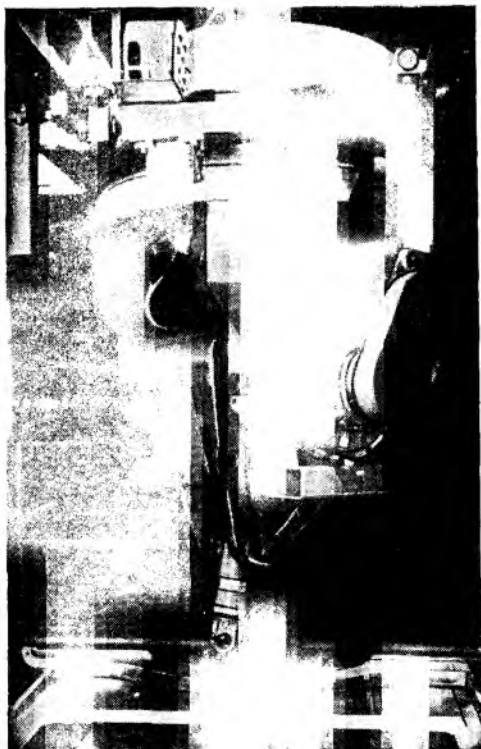


Рис. 9.7. Сварочный ПР фирмы КУКА

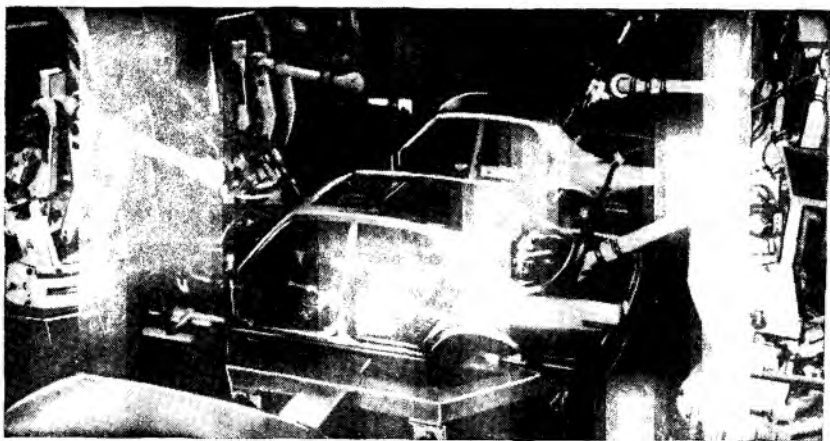


Рис. 9.8. Участок точечной сварки с помощью ПР кузовов автомобилей

движением луча по шву осуществляется в простейших случаях по жесткой программе, а при наиболее сложных траекториях стыков с применением адаптивного управления и обратной связи через телевизионную систему технического зрения.

С робототехническими комплексами для сварки схожи комплексы для пайки и резки (дугой, лазерным лучом, плазмой). Последние в частности, широко применяют для раскроя материала и снабжают обычно устройствами ЧПУ.

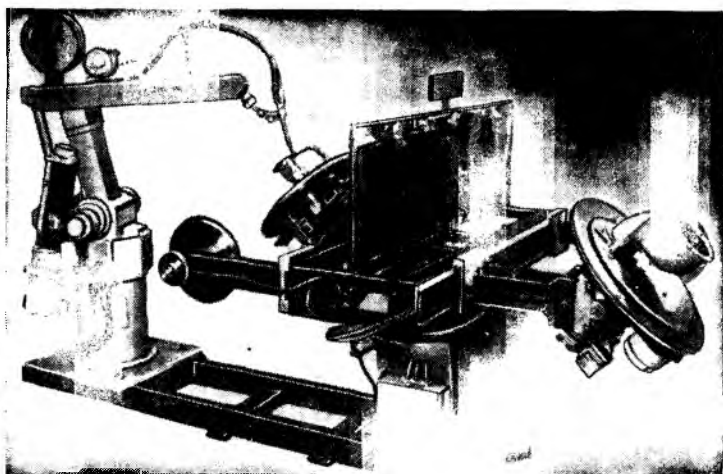


Рис. 9.9. Робототехнический комплекс для дуговой сварки с ПР «Мотомай» и двухкоординатным столом

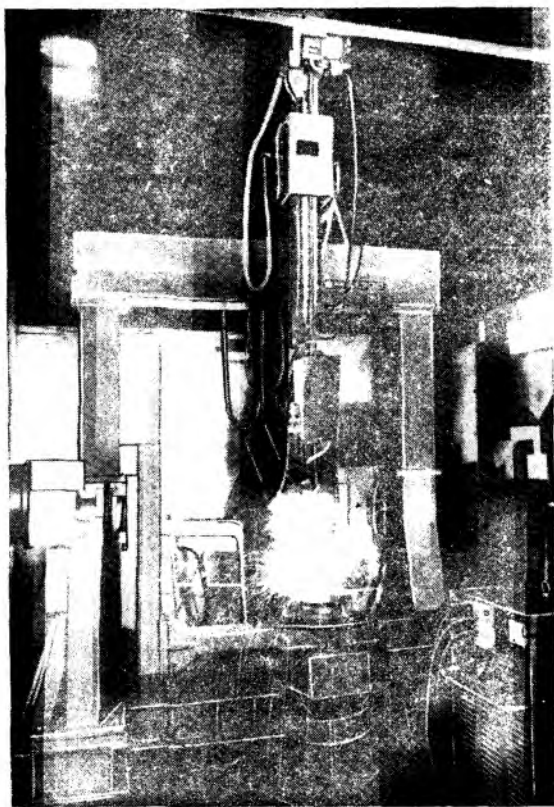


Рис. 9.10. Портальный ПР для дуговой сварки
ВНИИЭСО

9.4. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ для НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Промышленные роботы нашли применение на операциях нанесения покрытий различного назначения: лакокрасочных, защитных, упрочняющих, герметизирующих и т. п. Операции эти не только физически тяжелы, но и вредны для здоровья. 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. 4.11 показан ПР с пульверизатором в качестве рабочего органа. Управление такими ПР контурное, программирование — методом обучения. Однако по сравнению со сварочными ПР требования к точности ПР для нанесения покрытий существенно ниже, а к быстродействию, наоборот, выше. Применяется в этих ПР и адаптивное управление: с помощью системы технического зрения опреде-

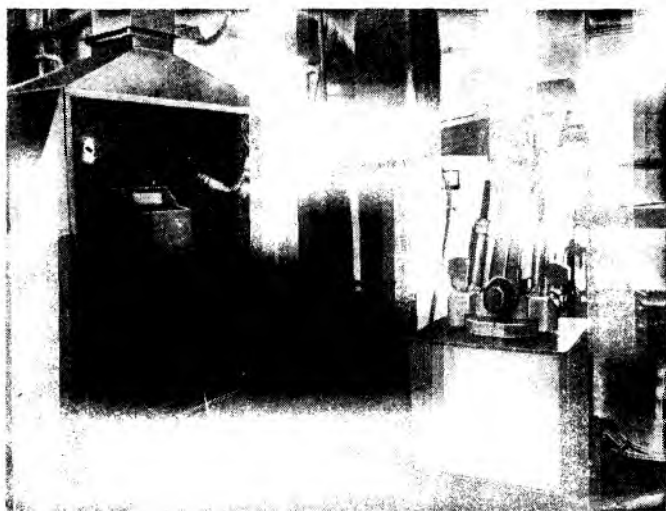


Рис. 9.11. Роботизированный окрасочный комплекс с ПР
фирмы «Девилбис» (США)

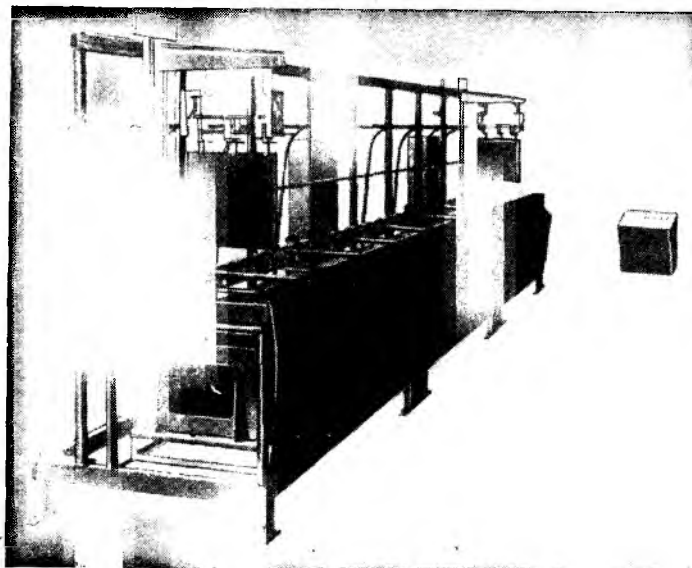


Рис. 9.12. Линии гальванопокрытий с автооператорами

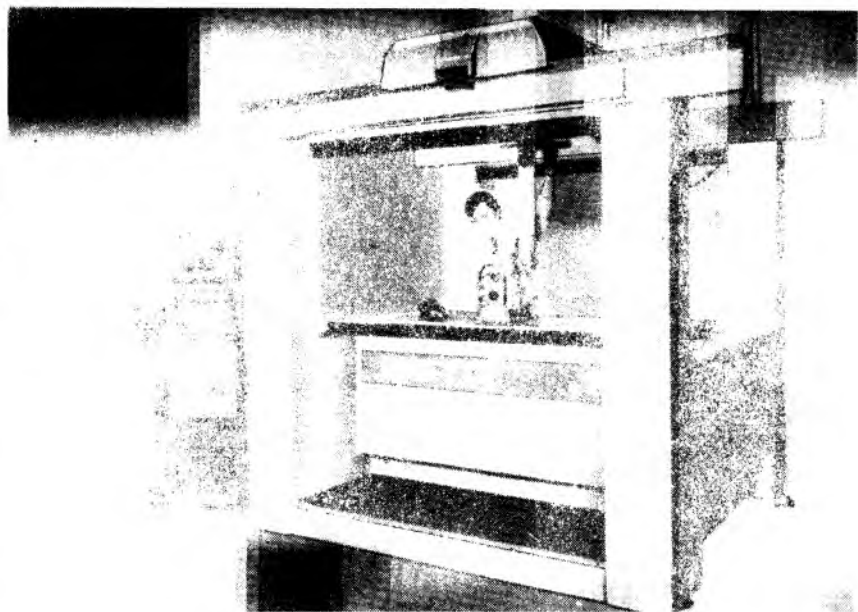


Рис. 9.13. Измерительная машина фирмы DEA (Италия)

ляются габариты очередного изделия, на которое должно быть нанесено покрытие, и по полученным данным автоматически выбирается и корректируется управляющая программа для ПР. На рис. 9.11 показан роботизированный комплекс окраски пульверизатором.

Другим вариантом является нанесение покрытий в электростатическом поле. Этот способ обеспечивает 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 комплексной автоматизации процессов нанесения гальванических покрытий. Основная манипуляционная операция здесь — это погружение в ванны деталей или корзин с деталями и перемещение их от одной ванны к другой. Операция эта выполняется с помощью простых автооператоров. На рис. 9.12 показана линия гальванопокрытий. Сегодня тысячи автооператоров заменяют рабочих в этом вредном производстве. Осталась, однако, одна операция, которая пока еще здесь не роботизирована, — это навеска деталей на входе и снятие их на выходе таких линий, что требует применения оцувствленных ПР, в том числе с техническим зрением.

Близки к процессу нанесения покрытий пескоструйная и дробеструйная обработка поверхностей. На этих операциях также нашли применение ПР с контурным управлением, описанным выше.

Из других основных технологических операций, где используются ПР с контурным управлением, следует назвать шлифование, зачистку (например, отливок), обрубку облоя.

Промышленные роботы с позиционным управлением применяют также на клепке и для контроля размеров. Для контроля размеров созданы специальные измерительные машины, рабочим органом которых является измерительный шуп. Манипулируя им, осуществляют ощупывание контролируемого изделия в нужных точках. Обычно такие измерительные машины имеют прямоугольную систему координат и ЧПУ, обеспечивающее точность до единиц микрометров. На рис. 9.13 показана такая измерительная машина фирмы DEA (Италия).

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, В КОТОРЫХ ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ВЫПОЛНЯЮТ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Одна из основных задач робототехники — замена рабочих, занятых на вспомогательных операциях. Хотя, как было указано выше, стоимость автоматизации вспомогательных операций в три-четыре раза ниже, чем основных операций, степень их автоматизации почти вдвое ниже, чем основных. В результате сегодня около половины рабочих, занятых в промышленности, работают на таких наименее престижных и не требующих высокой квалификации ручных операциях. Поэтому высвобождение занятых на подобных операциях рабочих за счет применения ПР не только является одним из основных путей решения очень острой проблемы трудовых ресурсов и более рационального использования их, но и имеет большое социальное значение.

Роботизированные технологические комплексы, 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. Соответственно, основными по значению типами таких РТК являются РТК механообработки, штамповки, прессования пластмасс, горячей штамповки иковки, литья под давлением, внутрицехового транспорта и т. д.

Распределение промышленных роботов по вспомогательным операциям в различных областях применения в машиностроении следующее (в %):

Механообработка	33
Штамповка холодная	46
Литье	2
Гальваника	3
Транспортирование	10
Прочее	6

Аналогично классифицируются РТК, где роботы применяют на вспомогательных операциях, в немашиностроительных отраслях народного хозяйства.

10.2. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ МЕХАНООБРАБОТКИ

Одна из главных областей применения ПР на вспомогательных операциях — это обслуживание металлорежущих станков. Здесь ПР выполняет более типичную вспомогательную операцию загрузки и выгрузки заготовок, т. е. установки обрабатываемой детали и окончания обработки. Аналогичные операции осуществляются при обслуживании большинства других типов технологического оборудования, хотя имеются и более специальные вспомогательные операции — смазка пресс-форм, окунание деталей в жидкость, межоперационная транспортировка, штабелирование, упаковка и т. д.

В технологическом оборудовании в РТК механические операции, выполняемые токарными, сверлильными, фрезерными, шлифовальными и т. д.

К операциям, используемым в РТК, предъявляются следующие основные требования: автоматический режим работы, взаимная согласуемость систем управления, возможность доступа ПР в зону установки детали на станке.

Для обеспечения автоматического режима РТК в его состав должны входить устройства размельчения и удаления стружки, смазки и охлаждения рабочих органов и инструмента, очистки поверхностей базирования, средства контроля качества обработки изделий, магнитной поштучной выдачи ориентированных деталей, устройства сортировки. В соответствии с первым требованием основным типом станков для РТК являются станки с ЧПУ.

Как упомянуто в параграфе 8.2, вследствие значительного времени механообработки здесь широкое применение получило обслуживание одним ПР нескольких станков. Варианты соответствующих компоновок РТК со стационарными и подвижными ПР приведены на рис. 8.3—8.5. На рис. 8.13 и 8.14 показаны такие РТК с подвижными ПР.

Для обслуживания станков в РТК в простейших случаях применяют ПР с циклическим управлением, а наиболее общим вариантом являются использование подвижных ПР. Эти ПР перепрограммируются в среднем времени переключения или режис, т. е. режис, чем обслуживаемые ими станки с ЧПУ. Длительность цикла работы таких ПР — единичная.

На рис. 8.13 показана простейшая роботизированная технологическая ячейка. Деталь, которую надо обработать ПР берет из левого ориентированного положения в ячеечке и подают поштучно к ПР. По окончании обработки на ПР кладет деталь и кладет ее в правый магазин.

Из таких ячеечек собирают целые участки, как было показано на рис. 8.5. При последовательном соединении ячеек все последующие ячейки получают деталь в ходе предыдущей ячейки. Однако для первого участка ячеек стоит задача предварительного размещения в нем дета

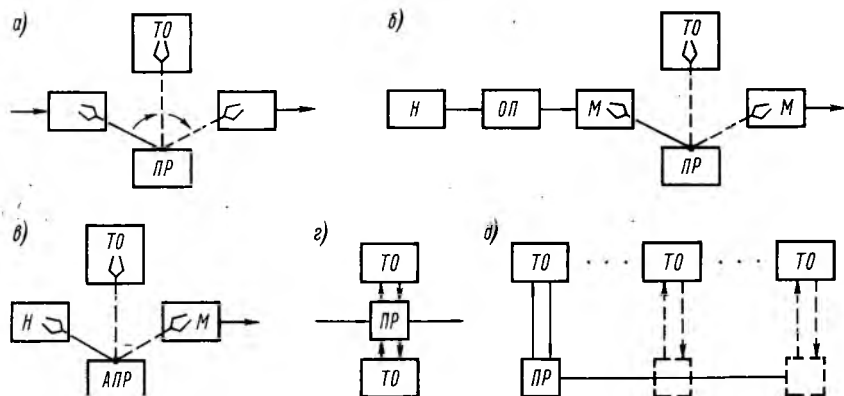


Рис. 10.1. Компоновки РТЯ «станок — ПР»:

ТО — основное технологическое оборудование; М — магазин с поштучной выдачей ориентированных деталей; ОП — ориентирующее устройство; Н — детали навалом; АПР — адаптивный ПР

лей, получаемых в общем случае в неориентированном виде, т. е. навалом.

Принципиально возможны следующие варианты решения этой задачи:

- загрузка магазина вручную,
- применение вместо магазина специального ориентирующего приспособления,
- использование для загрузки магазина адаптивного ПР,
- применение такого ПР для обслуживания станка без магазина на входе ячейки.

Первый вариант имеет тот очевидный недостаток, что не обеспечивает полностью автоматического режима работы всего технологического комплекса. Однако в настоящее время он вынужденно широко используется в связи с тем, что последующие варианты автоматического решения этой задачи пока технически реализованы и, соответственно, нашли применение только в отдельных частных случаях.

Так, широкое распространение получили специальные ориентирующие приспособления (рис. 10.1, б) типа вибробункеров и устройств ориентации металлических деталей электромагнитным полем. Однако применяются они главным образом для легких деталей массой десятки граммов.

Адаптивные ПР дают наиболее общее и гибкое решение задачи взятия любых деталей из навала. Однако в связи с тем, что такие ПР только начинают осваиваться промышленностью, они не получили еще достаточно широкого применения для решения рассматриваемой задачи.

Как указано выше, при использовании адаптивных ПР в свою очередь возможны два основных варианта:

- адаптивный ПР загружает магазины, которые затем подаются станкам;

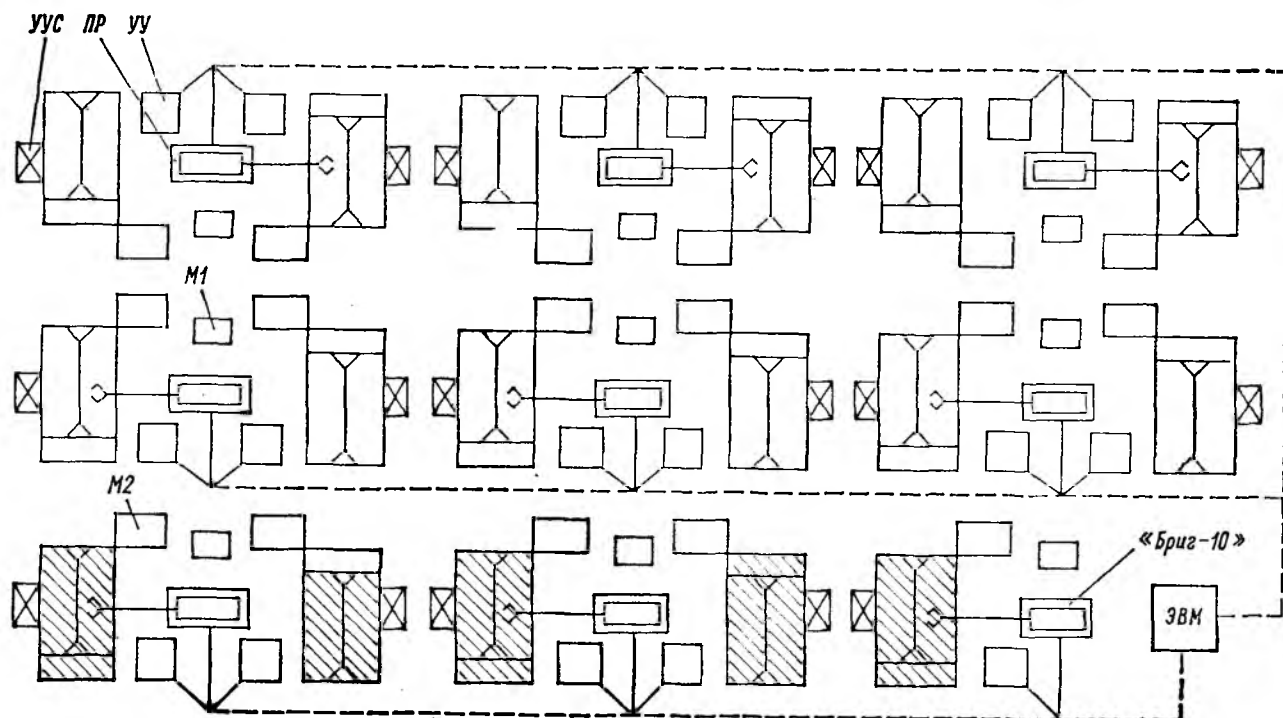


Рис. 10.2. Роботизированный участок механообработки шлицерно-торцевых соединений НПО «Буревестник» (Ленинград): М1 и М2 — магазин соответственно обрабатываемых и обработанных деталей; УУС — устройство удаления стружки; УУ — устройство управления

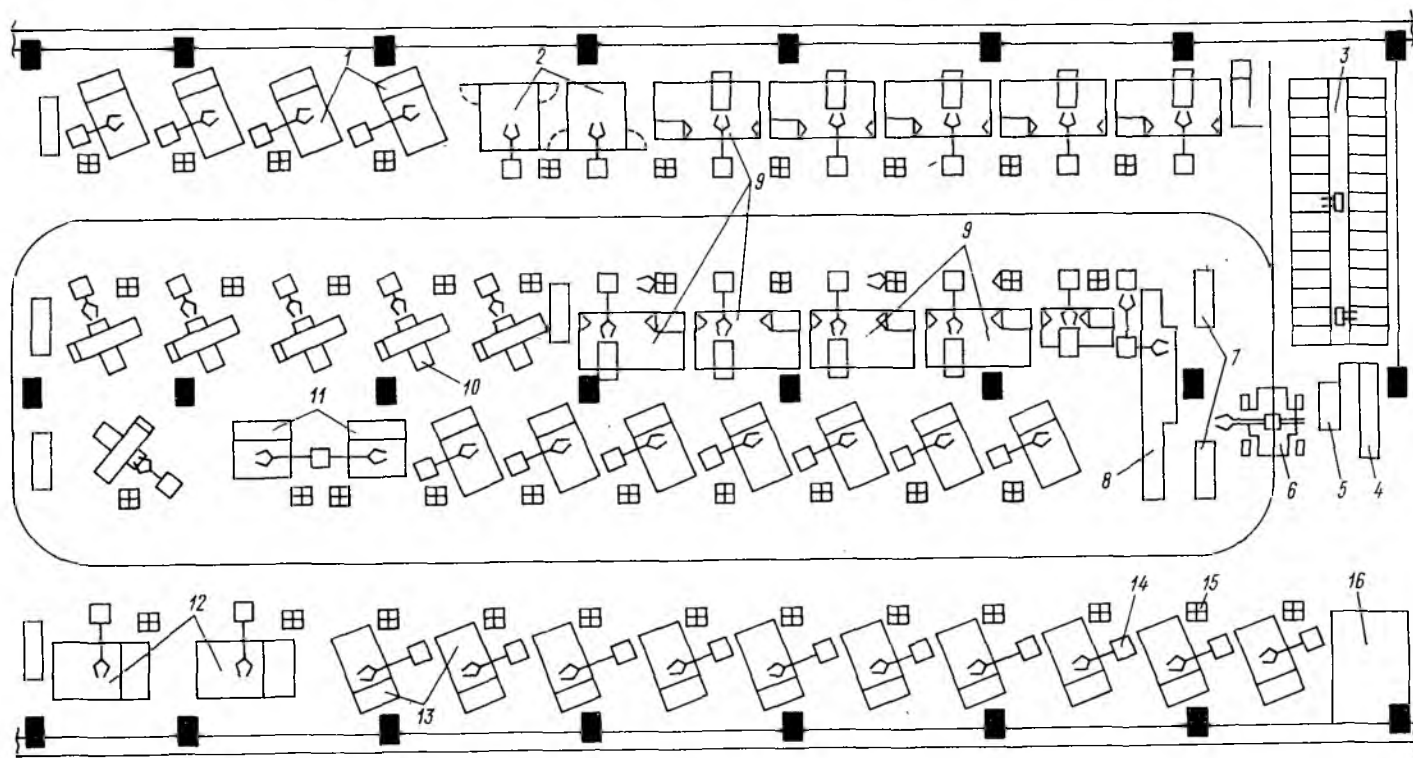


Рис. 10.3. Роботизированный цех механообработки:

1 — токарные станки СВ-18РА; 2 — станки 5В312, 5140; 3 — склад; 4 — загрузочное устройство; 5 — разгрузочное устройство; 6 — напольные транспортеры ПР типа МП-12Т; 7 — промежуточные склады; 8 — проходной станок 7655; 9 — шлифовальные станки 3А-2286, 3К225Ф3, 3М-151У, 3А-130, 3Г-182; 10 — фрезерные станки 6Р12Ф3; 11 — токарные станки АТПР-2М12с; 12 — токарные станки ПК20Ф3; 13 — токарные станки ПК20М; 14 — ПР; 15 — магазины; 16 — пульт диспетчера

адаптивный ПР сам обслуживает станок, беря детали непосредственно из навала (рис. 10.1, а).

Основной недостаток применения здесь адаптивных ПР — и значительная стоимость. Поэтому в тех случаях, когда могут быть использованы специальные ориентирующие приспособления, они являются более предпочтительными. К сожалению, однако, областей применения, как и вообще всех специальных устройств, ограничена крупносерийным и серийным производством с достаточно редкой сменяемостью обрабатываемых деталей. Для ослабления этого ограничения создаются перестраиваемые ориентирующие приспособления (со сменными частями и т. п.).

Вариант использования адаптивного ПР непосредственно для обслуживания станков применим в основном только при достаточно большом цикле обработки деталей на станке, когда цикл работы ПР заведомо меньше цикла работы станка. Особенно эффективно такое применение ПР, когда значительная длительность цикла обработки позволяет осуществить обслуживание одним ПР нескольких станков (рис. 10.1, б и в). В этом случае стоимость ПР соответственно распределяется на несколько технологических ячеек.

Применение адаптивных ПР для загрузки магазинов эффективно, когда имеется ряд магазинов, которые могут обслуживаться одним ПР в качестве общего гибкого загрузочного устройства.

На рис. 10.2 приведен пример роботизированного участка механообработки штифтерно-торцевых соединений, обслуживаемого цикловыми ПР «Бриг-10» (НПО «Буревестник», Ленинград). Общее управление участком осуществляется микро-ЭВМ «Электроника-60». На участке обрабатывается 31 группа деталей (на каждом станке — до четырех групп). Ячейки перенастраиваются через 2—5 дн. Уровень автоматизации участка — 0,85.

На рис. 10.3 показан цех механообработки, где автоматизированы все операции, включая транспортно-складские: используется автоматизированный склад типа СТАСС-1 и транспортная система на базе напольного транспортного ПР типа МП-12Т, управляемого от микро-ЭВМ «Электроника-60». Общая длина трассы — 150 м, число обслуживаемых мест — 62. Система управления включает устройство беспроводной связи и пульт с речевым командным устройством.

10.3. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

Одной из областей наиболее широкого применения ПР является холодная листовая штамповка. Объясняется это высокой травмоопасностью, достигающей 30 %, и монотонностью работы по обслуживанию прессов, а также сравнительной 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, т. е. подача его в штамп, и разгрузка штампа, т. е. сьем штамповки и укладка ее в магазин.



Рис. 10.4. Участок холодной листовой штамповки с ПР МП-9С в объединении ЛЭМЗ

Пример компоновки РТЯ холодной штамповки деталей типа «колпачок» с ПР типа МП-9С показан на рис. 8.12. Здесь справа виден магазин в виде кассеты с поштучной выдачей с помощью толкателя листовых заготовок, а слева — лоток для сбрасывания в магазин готовых колпачков.

На рис. 10.4 показан участок холодной листовой штамповки на заводе объединения ЛЭМЗ. Здесь используют те же ПР типа МП-9С, но модернизированные путем добавления второго упрощенного манипулятора для съема готовой штамповки. На рис. 8.1 и 8.2 представлены типовые компоновки РТК холодной штамповки.

Основной особенностью применения ПР на холодной штамповке по сравнению с механообработкой является необходимость обеспечить значительно большее быстродействие, поскольку цикл работы пресса измеряется всего несколькими секундами. Используемые здесь ПР имеют простое цикловое управление, как правило, цилиндрическую систему координат и не более трех степеней подвижности. Захватное устройство чаще всего выполняется в виде вакуумных присосок.

Для обеспечения необходимой скорости обслуживания пресса широко применяют ПР с двумя манипуляторами — один для разгрузки, а другой для загрузки штампа. Иногда для этих целей используют два одноманипуляторных ПР. Часто разгрузка осуществляется с помощью устанавливаемого на станине пресса специального толкателя или штамповка сдувается сжатым воздухом. На рис. 10.5 показан пример реализации в РТК холодной штамповки варианта компоновки с адаптивным ПР на входе для взятия заготовок из навала, показанной на рис. 10.1, б.

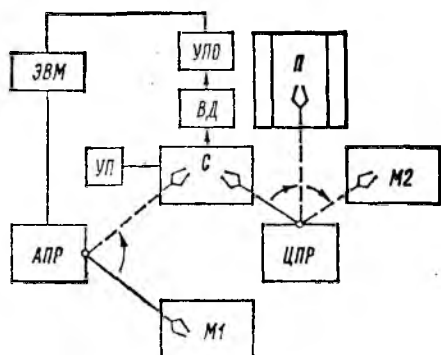


Рис. 10.5. Роботизированный комплекс холодной штамповки с адаптивным ПР на входе

заготовки. Далее в мини-ЭВМ «Электроника-60» вычисляются координаты и ориентация заготовки и формируются корректирующие сигналы в устройство управления АПР, по которым последний смещает заготовку на столе в расчетную позицию для возможности последующего взятия ее цикловым промышленным роботом ЦПР. Цикловой ПР устанавливает эту заготовку в пресс П, извлекает из него отштампованную деталь и кладет в магазин М2 готовых деталей.

На рис. 10.6 показана планировка цеха холодной листовой штамповки Бердского радиозавода. В состав цеха входят:

участок раскроя УР исходных материалов на базе комплексов КОН-2 и прессов с ЧПУ;

участок вырубki и кассетирования УВК;

шесть роботизированных участков штамповки РТУ-1—РТУ-6 крупногабаритных и мелких деталей на базе комплексов АКК-100Пр;

134 промышленных робота типа МП-9С и штамповочные линии типа Л533 (общее число прессов — 76);

четыре автоматизированных склада исходных материалов СМ, оснастки СО и готовой продукции СГП-1 и СГП-2;

три цеховые роботизированные транспортные системы для готовой продукции, заготовок, оснастки и технологических отходов;

две роботизированные транспортно-складские системы участка ТССУ.

Система автоматизированного управления цехом

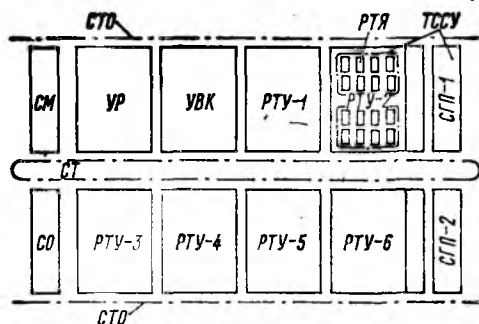


Рис. 10.6. Планировка роботизированного цеха холодной листовой штамповки:

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; ТССУ — транспортно-складская система участка; СГП-1 и СГП-2 — склады готовой продукции; СМ — склад материалов; СО — склад оснастки.

осуществляет оперативное и календарное планирование производства в целом, включая определение потребностей в материалах, заготовках, планирование и управление для отдельных участков, складов и транспортных систем, решение других задач АСУ цеха, в том числе обмен информацией с АСУ завода.

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 ЭВМ. Заготовки сдаются на склад заготовок. Отсюда по команде АСУ цеха они поступают через транспортную систему на линию кассетирования, и далее заполненные кассеты попадают 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 типа МП-12Т. Общее управление цехом осуществляет оператор с помощью пульта, на который поступает информация о выработке кассет с заготовками, заполнении магазинов готовой продукции, положении транспортно-загрузочных роботов, возможных неисправностях в работе оборудования.

10.4. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Основным стимулом 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 ~~этого~~ производства представляет значительные трудности и в полной мере до настоящего времени еще не решена. Связано это прежде всего со сложностью работы кузнеца. Поэтому наряду с ПР здесь широко применяют манипуляторы с ручным и автоматизированным управлением — ковочные телеоператоры, управляемые квалифицированным кузнецом-штамповщиком.

Автоматизации подлежат следующие операции: загрузка заготовок в нагревательную печь, извлечение нагретой заготовки из печи, перемещение ее к ковочному прессу, манипулирование заготовкой при ковке, укладка готовой поковки в магазин. Кроме того, имеется еще ряд таких вспомогательных операций, как смазка и обдувка штампа (сдув окалины), обрезка облоя с детали и укладка его в тару.

Наиболее сложной операцией является собственно штамповка на прессе, которую пока только в достаточно простых случаях удается автоматизировать с помощью ПР-кузнеца. В более же сложных случаях осуществляется частичная автоматизация, с сохранением рабочего-кузнеца, который использует ковочный телеоператор или

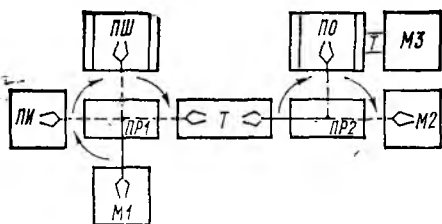


Рис. 10.7. Роботизированный комплекс горячей штамповки:

ПИ — печь индукционная; ПШ — пресс кри-
вошипный горячештамповочный; ПО — пресс
обрубочный; ПР1 — робот-кузнец; ПР2 —
робот-обрубщик; Т — транспортер; М1, М2,
М3 — магазины соответственно для загото-
вок, поковок и облоя

другой вариант управляемого человеком ковочного манипулятора.

На рис. 10.7 показана схема РТК горячей объемной штамповки, включающего два ПР: ПР1 — робот-кузнец и ПР2 — робот-обрубщик. Робот-кузнец обслуживает индукционную печь для нагрева заготовок и пресс горячей штамповки, а робот-обрубщик — обрубной пресс для обрубки облоя с поковки. Поковки к обрубному прессу и облой в магазин транспортируются с помощью транспортера.

Сегодня более 80 % выпускаемой номенклатуры поковок массой 25—500 кг изготавливают методом свободной ковки. В ЭНИКмаш разработан РТК свободной ковки с манипулятором, управляемым оператором (рабочим-кузнецом). Комплекс включает гидравлический пресс и электромеханический манипулятор грузоподъемностью 630 кг, с помощью которого осуществляется манипулирование заготовками при ковке.

Оператор управляет манипулятором в интерактивном режиме, т. е. с периодическим обменом информацией и автоматическим выполнением отдельных операций. В целом система управления комплексом предусматривает режимы:

полуавтоматическое управление прессом с помощью клавиш на пульте управления;

полуавтоматическое управление манипулятором в копирующем режиме с помощью задающей рукоятки, расположенной 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.

Устройство управления выполнено на микро-ЭВМ «Электроника-60».

10.5. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Процесс производства деталей методом литья под давлением заключается в заливке через горловину в машину литья под давлением определенной порции жидкого металла, взятого из печи, в удалении затем готовой отливки и подаче ее для обрубки литникового остатка. Кроме того, необходимо осуществлять смазку и обдув пресс-форм. Эффективность применения ПР для обслуживания

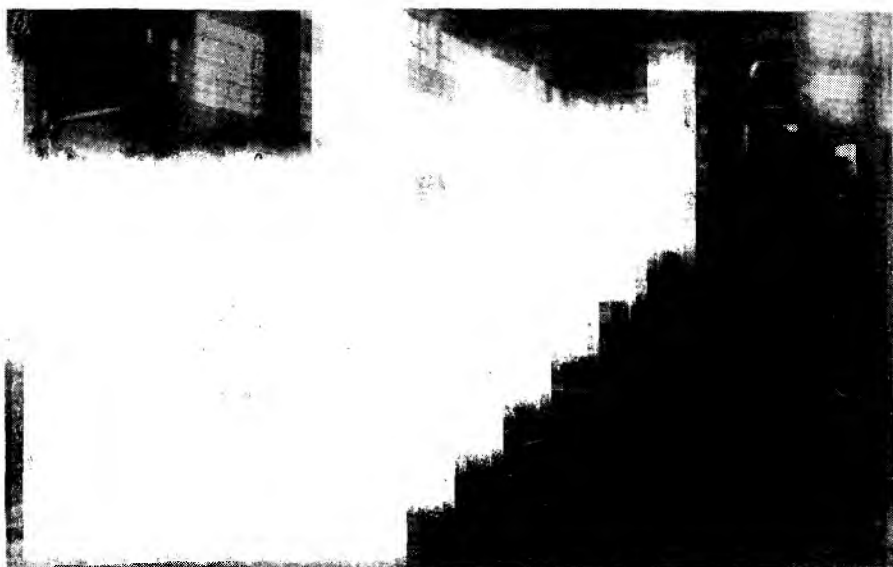
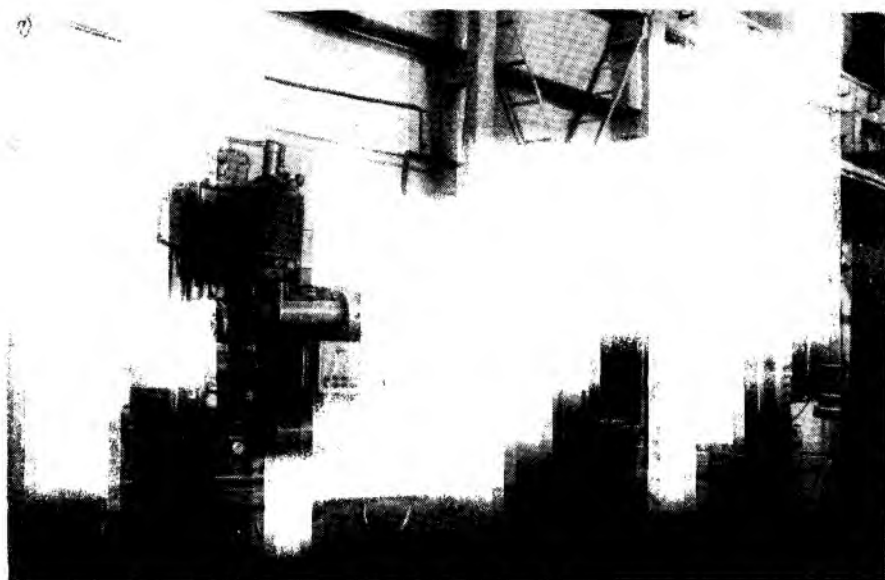


Рис. 10.8. Роботизированный комплекс литья под давлением: *а*— вид со стороны робота-заливщика; *б*— вид со стороны робота, снимающего отливку:

— машина для литья под давлением АЛ711Б09; 2 — робот-заливщик; 3 — робот для снятия отливки; 4 — пресс для обрубки литников

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 простой оборудования и снижение производительности из-за большой 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, прессы для обрубки литников, робота-заливщика и робота для взятия отливки и охлаждения ее в баке с водой.

На рис. 10.8 показан участок литья под давлением, обслуживаемый двумя ПР. Процесс работы состоит из следующих операций. 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 основная операция прессования. После раскрытия пресс-формы отливка выталкивается толкателем и переносится вторым роботом в бак с водой, где происходит ее охлаждение. Затем тем же роботом она подается на пресс для обрубки литников и сбрасывается в магазин.

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТОВ

В параграфе 3.1 дана общая классификация роботов, а в параграфе 8.1 — классификация основанных на их использовании технологических комплексов применительно к машиностроительным отраслям промышленности, где роботы нашли свое основное применение. В этой главе рассмотрены роботы и использующие их комплексы и системы, предназначенные для других применений, т. е. вне машиностроения.

Для удобства последующего изложения разобьем эти роботы по назначению на следующие группы:

роботы, применяемые в немашиностроительных отраслях народного хозяйства;

космические роботы;

подводные роботы;

шагающие машины.

В этой последовательности ниже рассмотрены получившие на сегодня более или менее существенное применение вне машиностроения типы роботов и роботизированных комплексов.

11.2. РОБОТЫ В НЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЯХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Одной из качественных особенностей развития отечественной робототехники с начала одиннадцатой пятилетки явилось быстрое расширение сферы ее применения на немашиностроительные отрасли народного хозяйства и прежде всего на отрасли, указанные в Постановлении ЦК КПСС от 31 июля 1980 г. по этой проблеме. угольную и горнодобывающую промышленность, черную и цветную металлургию, сельское хозяйство, строительство, легкую и пищевую промышленность, транспорт. Важность развития робототехники в этих направлениях очевидна уже из того факта, что здесь используется большая часть трудовых ресурсов страны, а степень автоматизации ниже, чем в машиностроении.

Сегодня средства робототехники в немашиностроительных отраслях народного хозяйства развиваются прежде всего в направлении использования опыта машиностроительных отраслей по применению созданных там роботов на тех же или аналогичных операциях — при обслуживании 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 роботов и неавтоматических манипуляторов, специально предназначенных для этих отраслей, пока еще невелик. Общее количество используемых в немашиностроительных отраслях народного хозяйства роботов и манипуляторов не превышает 10—15 % общего парка страны. Предварительный анализ основных немашиностроительных отраслей показал, что только за счет использования роботов общепромышленного применения эта величина может быть увеличена примерно вдвое.

Однако для основной части производства в этих отраслях требуются создание и организация производства роботов специальных типов. В табл. 11.1 приведены примеры первоочередного применения средств робототехники в ряде немашиностроительных отраслей народного хозяйства. 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 первого поколения, т. е. с чисто программным управлением, и требуются прежде всего роботы оцувствленные с адаптивным управлением. Это объясняется тем, что в немашиностроительных отраслях существуют значительно ббльшая неопределенность и варьированность как параметров объектов манипулирования, так и внешней среды в целом. Здесь требуется большее количество подвижных роботов (в том числе для передвижения по пересеченной местности), роботов повышенной грузоподъемности и предназначенных для работы в экстремальных внешних условиях.

Программой работ Госкомитета СССР по науке и технике по робототехнике до 1990 г. предусмотрено проведение анализа немашиностроительных отраслей народного хозяйства с целью определения первоочередных областей применения роботов, разработки технических требований к ним, оценки потребности и ожидаемого экономического и социального эффекта от внедрения роботов. Завершенный в 1982 г. первый этап этой работы позволил сформулировать требования примерно к 80 типам роботов и оценить потребность в них до 1995 г., которая составляет сотни тысяч штук, т. е. оказалась соизмеримой с потребностью на этот период всех машиностроительных отраслей народного хозяйства.

Одновременно с выработкой заданий на создание новых типов роботов разворачивается разработка отдельных типов роботов и основанных на их использовании технологических комплексов, которые требуются для решения наиболее острых и очевидных проблем автоматизации производственных процессов в немашиностроительных отраслях. Ряд таких работ приведен в табл. 11.1. Остановимся на некоторых из них.

Важной задачей в горном деле является создание роботизированных комплексов для безлюдной выемки полезных ископаемых. Это позволит коренным образом решить проблему трудовых ресурсов в этой области, высвободив сотни тысяч горняков от работы в тяжелых и опасных подземных условиях, повысить в 4—10 раз производительность труда, существенно уменьшить себестоимость добычи и свести до минимума потери руды.

**11.1. Примеры применения средств робототехники
в машиностроительных отраслях народного хозяйства**

Операция	Основные требования к роботам
<i>Угольная и горнодобывающая промышленность</i>	
Установка крепи в забое Бурение шурпов Отделение угля от породы Погрузка горной массы Погрузо-разгрузочные работы в обога- тельном производстве	Подвижный робот с техни- ческим зрением и двумя ма- нипуляторами Многоманипуляторный по- движный робот с навигацион- ной системой Робот с техническим зре- нием и другими средствами ощущения Подвижный робот-погрузчик
<i>Металлургия</i>	
Загрузка чушек и металлолома в печь Ремонт огнеупорной кладки печей, домен Пробивка корки шлака и устранение анодного эффекта при электролизе алюминия Извлечение штырей в электролазерах и их перестановка Укладка и обвязка пакетов чушек, их по- грузка и доставка	Манипулятор с ручным упра- влением Подвижный робот
<i>Сельское хозяйство</i>	
Уборка овощей и фруктов Прополка и прореживание овощей Обслуживание теплиц Товарная доработка плодовоовощной продукции (сортировка и загрузка в контейнеры) Обслуживание свиноводческих комплексов и комплексов для крупного рогатого скота Дойка и санитарная обработка вымени коров Стрижка овец Погрузо-разгрузочные работы с сельскохо- зяйственной продукцией, сеном, силосом, удо- блениями и т. п. Вождение тракторов и других сельскохозяй- ственных машин	Робот с техническим зре- нием для работы в комплексе с прореживателями типа ПСА-2,7 и т. п. Подвижный робот (для вы- ращивания рассады, уборки продукции) Робот-тракторист
<i>Лесозаготовительное производство</i>	
Валочно-пакетирующие работы для лесосек	По типу манипуляторов ЛП-19, ЛТ-157, ВМ-4

Операция	Основные требования к роботам
<i>Деревообрабатывающее производство</i>	
Погрузочные работы	Роботы, аналогичные применяемым в машиностроительном производстве
<i>Строительная промышленность</i>	
Укладка кирпичей Сортировка кирпича на конвейере	Робот-каменщик Робот с техническим зрением и дальномерной системой
Загрузка печей кирпичами и выгрузка Облицовочные работы	Робот для монтажа облицовочных плиток (в том числе по определенному рисунку) Робот-монтажник-высотник
Монтаж металлоконструкций (зданий, мостов, резервуаров и т. п.) Окрасочные работы	Робот-маляр
<i>Легкая и пищевая промышленность</i>	
Обслуживание основного технологического оборудования (пряделных и швейных машин, агрегатов, формирующих синтетические нити, прессов горячей вулканизации, печей для обжига керамических изделий и т. п.) Внутрицеховые погрузо-разгрузочные и транспортные работы Раскрой кожи и других материалов Укладка в тару конфет, овощей (при консервировании) и т. п. Погрузо-разгрузочные работы в холодильниках	
<i>Транспорт</i>	
Погрузо-разгрузочные работы Регламентное обслуживание железнодорожных путей Шагающие транспортные машины	
<i>Медицина</i>	
Хирургия (микрохирургия, дистанционная хирургия, стерильная хирургия, хирургия внутри организма с введением внутрь манипулятора или мини-робота) Протезирование конечностей Уход за больными и инвалидами Помощь при передвижении слепых людей, при реабилитации инвалидов и больных	
<i>Сфера обслуживания</i>	
Погрузо-разгрузочные работы Уборка помещений Мойка окон высотных зданий Уход за детьми	
Робот-домохозяйка Робот-няня и игрушка	



Рис. 11.1. Самоходный робототехнический проходческий комбайн ПК-9р

В состав таких комплексов должны входить РТК для установки крепи-опалубки в забое, роботы — бурильщики шурпов, роботы-взрывники, роботы — погрузчики горной породы, роботы по обслуживанию технологических комплексов для проведения выработок. Подобные роботы должны снабжаться, как правило, развитой системой очувствления, включая техническое зрение, несколькими манипуляторами, иметь взрывобезопасное исполнение и быть подвижными.

На рис. 11.2 показан робот — бурильщик шурпов, а на рис. 11.1 — самоходный робототехнический проходческий комбайн ПК-9р.

На рис. 11.3 представлен РТК для чистки и выбивки футеровки разливочных ковшей в металлургии. Ковш располагается на позиционере, с помощью которого осуществляются перемещение ковша в горизонтальной плоскости и опрокидывание его для сброса выбитой футеровки.

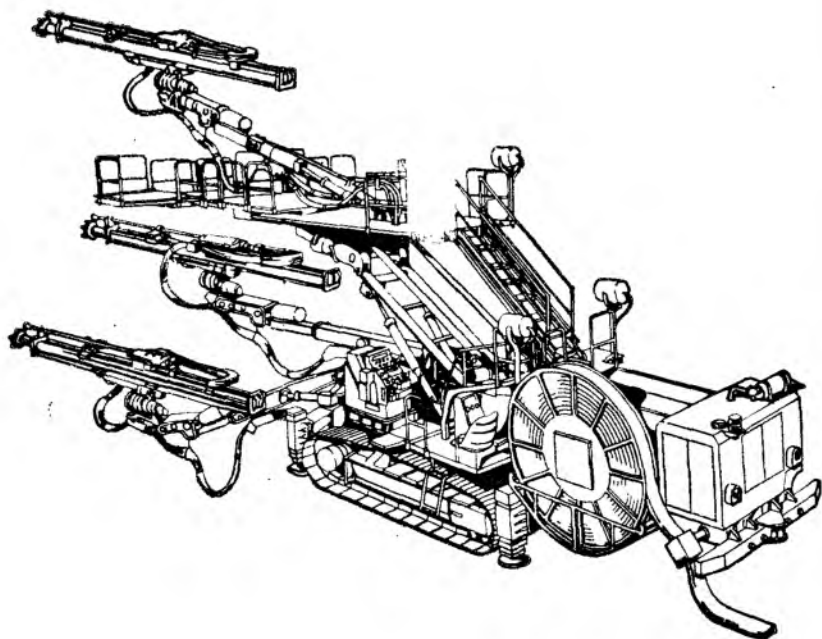


Рис. 11.2. Робот для бурения шурпов (робот-бурильщик)

Широкие возможности для комплексной автоматизации открывает робототехника в сельском хозяйстве. Основные особенности применения здесь средств робототехники заключаются в большой территориальной протяженности и разобщенности предприятий, сезонности работ, сильной зависимости от погодных-климатических условий, в непосредственном контакте с животными и растительными организмами, имеющими большую разбросанность характеристик и существенные специфические требования по взаимодействию с ними.

Одной из важных задач в полевом хозяйстве является создание роботов для вождения тракторов, комбайнов и других машинно-тракторных агрегатов с высвобождением работников самой массовой здесь профессии — трактористов.

Роботы-трактористы должны быть приспособлены для замены тракториста на его стандартном рабочем месте. Это позволит оперативно использовать такие роботы на серийных машинно-тракторных агре-

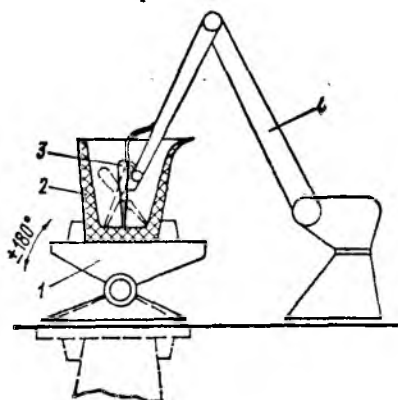


Рис. 11.3. Роботизированный комплекс для чистки и выбивки футеровки разливочных ковшей:

1 — позиционер; 2 — разливочный ковш; 3 — отбойник; 4 — промышленный робот

гатах, заменять трактористов при выполнении работ особо опасных (внесение ядохимикатов) или утомительных (вождение культиваторов и прореживателей строго по рядкам растений и т. п.), осуществлять групповое вождение тракторов и других машин с роботами-трактористами 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. Поэтому, в частности, здесь особенно остро стоит проблема нехватки рабочей силы, разрешить которую можно с помощью роботов. Кроме того, производительность труда на ряде операций здесь ограничена физическими возможностями человека. Например, для укладки рассады в высаживающий аппарат требуются шесть сажальщиц на каждой рассадопосадочной машине, которые должны работать в ритме примерно одна операция в секунду в условиях тряски, пыли, при различной погоде.

В теплицах применение подвижных роботов позволит комплексно автоматизировать большой круг работ по подготовке почвы, высеву семян, опрыскиванию химикатами, сбору готовой продукции (рассады, овощей, фруктов), их сортировке и укладке в тару. На рис. 11.4 показан образец робота для сбора огурцов и помидоров. Робот передвигается вдоль теплицы по технологическим трубопроводам и имеет электромеханический манипулятор со специальным плодотделителем в качестве рабочего органа. Система обнаружения и распознавания состоит из двух сканирующих зеркал и фотоприемника. Распознавание осуществляется путем сравнения с эталоном. Подобные роботы-овощеводы создаются во Всесоюзном институте сельскохозяйственного машиностроения.

Аналогичные задачи необходимо решать на стационарных пунктах послеуборочной обработки овощей и картофеля, включая их сортировку, отделение примесей и некондиционных экземпляров. На рис. 11.5 представлен робототехнический комплекс для загрузки капусты и других овощей в контейнеры, разработанный



Рис. 11.4. Робототехнический комплекс для сборки огурцов и помидоров в теплице

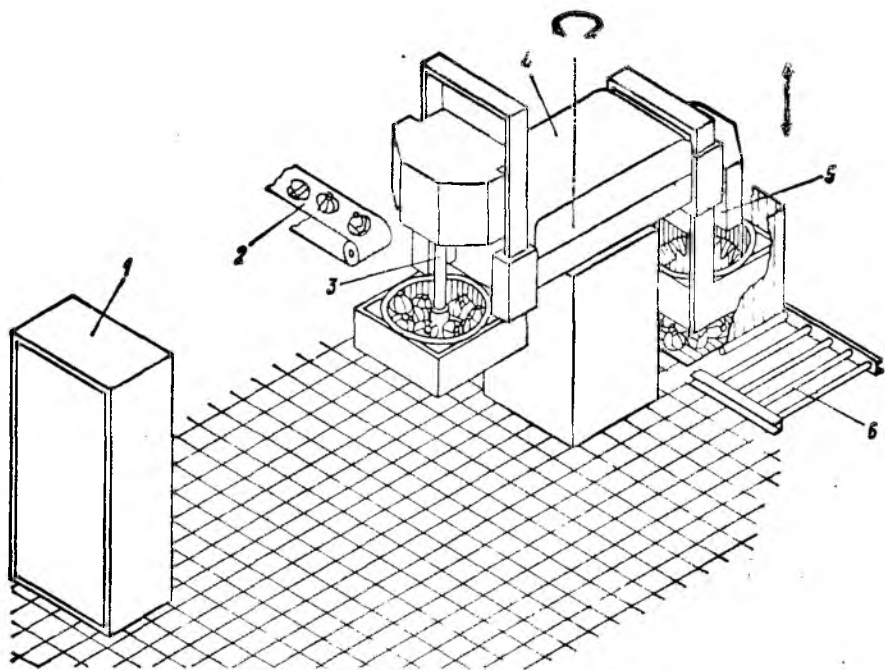


Рис. 11.5. Роботизированный комплекс для погрузки капусты

ЦНИИ РТК и НИПТИМЭСХ. Комплекс выполняет следующие операции:

- подает пустые контейнеры в зону загрузки;
- загружает капусту в контейнер;
- перемещает загруженные контейнеры в зону накопления готовой продукции.

Комплекс включает робот-загрузчик 4, транспортер-накопитель 2 готовой продукции, шаговый напольный контейнер-подаватель 6 и пульт управления 1. Робот имеет два манипулятора 3 и 5, снабженных тактильными датчиками. Благодаря аккуратному обращению с капустными кочнами полностью исключено их повреждение, которое при других используемых на сегодня способах загрузки достигает 45 %. Такой комплекс высвобождает четыре-пять человек в смену.

В животноводстве и птицеводстве первоочередной задачей по роботизации производства является создание роботов для выполнения следующих работ:

- основных технологических операций, включая дозированную задачу кормов, выпойку телят молоком, разбрасывание подстилки, уборку навоза, дезинфекцию помещений, взвешивание животных и т. д.;
- механизированного доения коров;
- санитарной обработки вымени коров;
- дефектоскопии и сортировки яиц в неорганизованных потоках с последующей укладкой в тару.

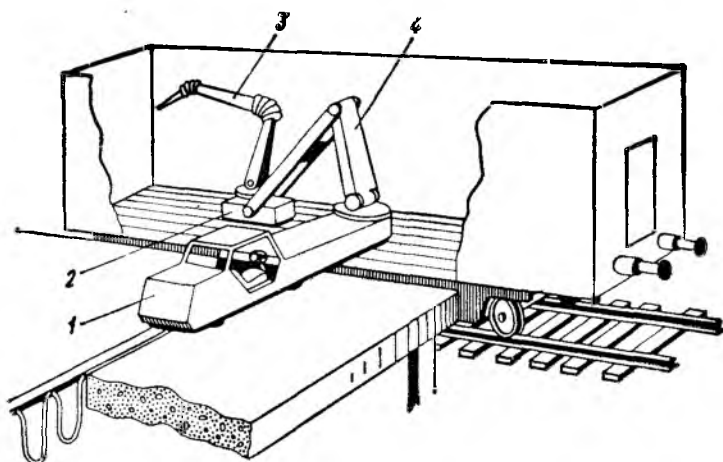


Рис. 11.6. Робототехнический комплекс для химической обработки железнодорожных вагонов:

1 — тележка с оператором; 2 — подвижное основание; 3 — промышленный робот; 4 — пантографическая стрела

На рис. 11.6 показан пример применения 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.

Быстро расширяется применение средств робототехники в легкой и пищевой промышленности. На тбилисской швейной фабрике имени «1 мая» роботы осуществляют раскрой тканей и обработку деталей одежды. Аналогичные операции выполняют роботы в ГДР на берлинском предприятии «Фортшрит». В Японии созданы роботы для кройки и пошива одежды, на базе которых проектируется предприятие, где роботы полностью заменят рабочих.

Роботы используют для укладки в ящики и упаковки сахара-рафинада, хлебобулочных изделий, изделий парфюмерии, для раскладки конфет в коробки и т. д. (рис. 11.7).

Большие перспективы имеет робототехника в медицине (см. табл. 11.1): в хирургии, протезировании, для обслуживания больных и инвалидов. На основе достижений робототехники создаются все более совершенные искусственные конечности — протезы рук и ног из легких композитных материалов, имеющие приводы, встроенные микропроцессорные устройства управления и биологические обратные связи. Созданы искусственные скелеты с приводами, так называемые экзоскелетоны (экзо означает «внешний», «наружный»), для парализованных людей (см. рис. 1.12).

В ряде стран (США, Японии) ведутся работы по созданию роботов для обслуживания больных и инвалидов. Такие роботы имеют

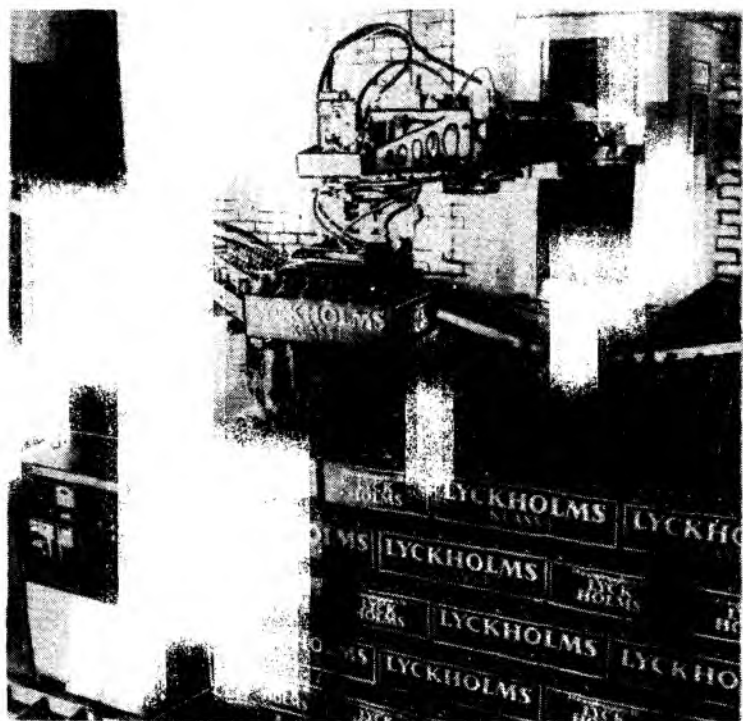


Рис. 11.7. Робототехнический комплекс для укладки ящиков

телевизионное техническое зрение, систему радиоуправления и управления голосом, устройство передвижения. Ведутся также разработки роботов для использования в домашнем хозяйстве: уборки помещений, работы на кухне, прислуживания за столом, охраны квартиры, в том числе противопожарной, для открывания и закрывания входной двери, обслуживания телефона, радио- и телевизионной аппаратуры и т. п. В США создан робот — ночной сторож («Центурион-1»). Он имеет колесный ход, инфракрасную систему обнаружения людей, устройство для лишения подвижности нарушителя с помощью ультразвука, веселящего или парализующего газа, электрических разрядов.

В целом робототехника в немашиностроительных отраслях народного хозяйства развивается сегодня прежде всего на базе опыта, накопленного в машиностроении, и в той же последовательности: анализ отраслей, определение технических требований к роботам и потребностей в них, унификация совместно с машиностроительными отраслями на основе модульного подхода, создание и отработка типовых роботизированных технологических ячеек, организация их серийного производства и комплектных поставок, создание на этой основе крупных образцово-показательных комплексов и, наконец, тиражирование последних в рамках отраслей.

11.3. КОСМИЧЕСКИЕ РОБОТЫ

Космос — характерный пример экстремальных внешних условий, когда замена человека роботом не только освобождает от опасного и тяжелого труда, но и дает возможность решать такие задачи, которые принципиально не могут быть решены при непосредственном участии человека. В качестве примера последней ситуации достаточно назвать задачу изучения дальнего космоса и далеких планет.

Помимо крайне неблагоприятных внешних условий (вакуум, радиация, невесомость, большой диапазон температур) применение роботов в космосе связано с необходимостью повысить производительность труда, его качество и надежность в этих условиях, манипулировать предметами очень большой массы и габаритов (например, при решении задач сборки на орбите), а также практически неограниченно увеличить длительность деятельности в космосе, в том числе без возможности возвращения на Землю.

Роботы в космосе имеют следующие области применения:

- работа в открытом космосе (свободно перемещающиеся роботы для сборочных, погрузо-разгрузочных и спасательных работ, захвата и инспекции неизвестных объектов и т. д.);

- работа на поверхности планет и других космических тел;

- работа внутри и снаружи космических кораблей (их обслуживание, регламентные и ремонтные работы).

Соответственно можно выделить три основных типа космических роботов: свободнолетающие роботы, напланетные роботы, роботы космических кораблей (обслуживающие роботы).

Космические роботы и управляемые оператором неавтоматические манипуляторы имеют, как правило, электромеханические приводы. При этом в отличие от роботов, применяемых в обычных земных условиях, мощность их приводов выбирается на несколько порядков меньшей при той же массе объектов манипулирования. Однако при этом неизбежно пропорционально снижается быстродействие робота из-за соответствующего уменьшения ускорения при перемещении объектов, обладающих определенной инерцией. Но этой ценой зато достигается снижение массы и энергопотребления робота, что, как известно, особенно важно для космической техники.

На рис. 11.8 показан один из проектов свободнолетающего космического робота [13]. Робот состоит из двигательной установки с системой двигателей, создающих усилие по отдельным степеням подвижности робота, системы питания двигателей с топливными баками, двух сменных манипуляторов с устройством управления, навигационной системы, системы ориентации робота, системы радиосвязи, телевизионной системы, включающей две неподвижные и одну подвижную передающие телевизионные камеры, а также осветители. Поперечный размер робота — примерно 1 м, масса — около 200 кг.

На рис. 11.9 показан многоразовый космический корабль типа «Шаттл» с двумя манипуляторами, а на рис. 11.10 приведена конструкция одного из манипуляторов [11, 13]. Манипуляторы шар-

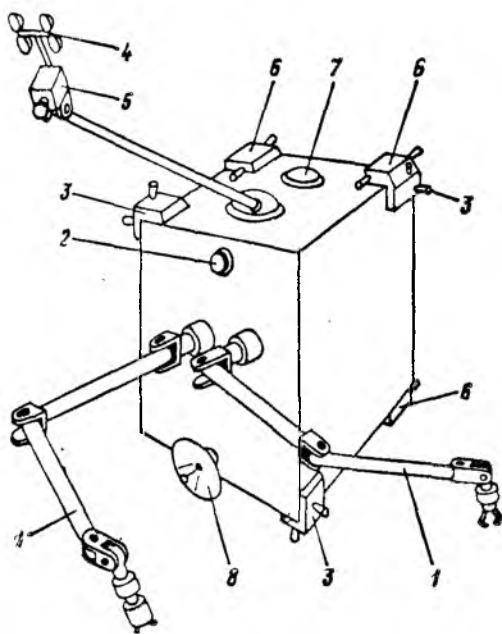


Рис. 11.8. Свободнолетающий космический робот:

1 — манипуляторы; 2 — неподвижная телекамера; 3 — двигатели ориентации; 4 — осветители; 5 — подвижная телекамера; 6 — двигатели движения вперед-назад; 7 — радиоантенны; 8 — радиолокатор

нирного типа с шестью степенями подвижности имеют электрические приводы. Длина манипулятора — около 15,3 м, усилие в захватном устройстве — примерно 5 кгс. Наибольшая масса объекта манипулирования — 3 т. Линейная скорость с грузом — до 0,03 м/с, без груза — до 0,6 м/с. Погрешность позиционирования — 5 мм. В исходном положении манипуляторы крепятся вдоль корабля в специальных зажимах.

Захватные устройства манипуляторов сменные. На кисти каждого манипулятора укреплена телевизионная камера. Кроме того, на корпусе корабля размещено несколько телевизионных камер и осветителей, в том числе четыре подвижные камеры находятся по краям грузового отсека, откуда с помощью манипуляторов берутся в куда помещаются транспортируемые кораблем грузы.

Устройство управления манипуляторов с пультом управления размещено в кабине корабля. Система управления манипуляторами обеспечивает ручной, полуавтоматический и автоматический режимы управления. Для ручного управления оператор использует две ру-

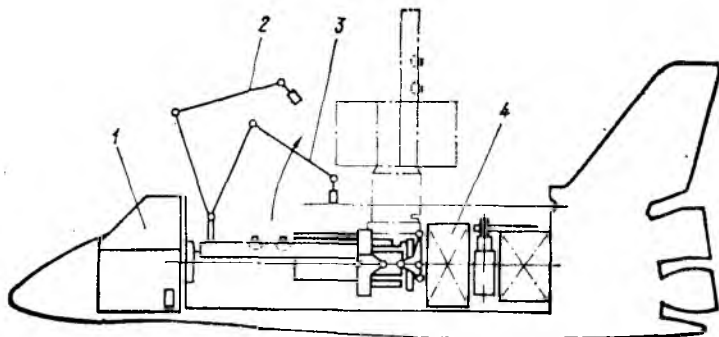


Рис. 11.9. Многоразовый космический корабль типа «Шаттл» с двумя манипуляторами:

1 — кабина; 2, 3 — манипуляторы; 4 — полезный груз

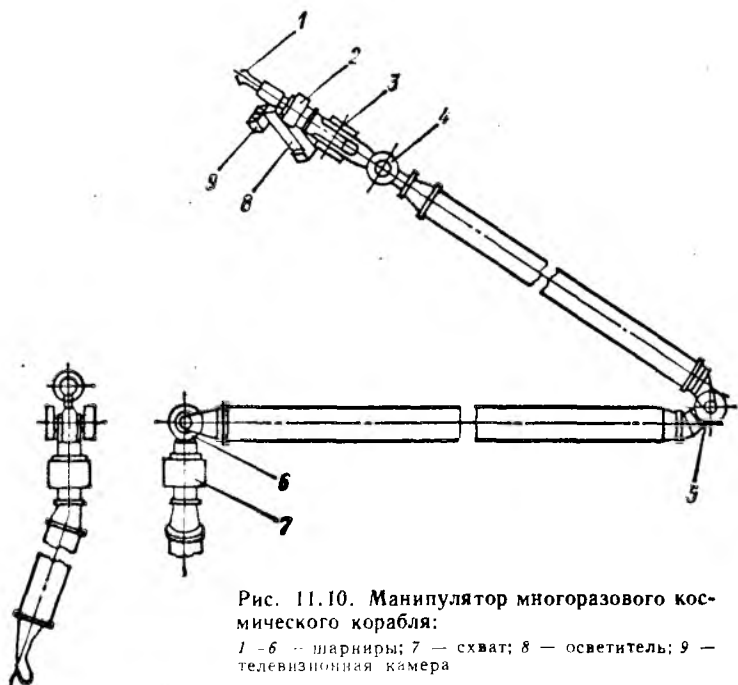


Рис. 11.10. Манипулятор многоразового космического корабля:

1 - 6 — шарниры; 7 — схват; 8 — осветитель; 9 — телевизионная камера

коятки, каждая из которых имеет три степени подвижности. Одна (левая) рукоятка служит для управления тремя поступательными, а другая (правая) — тремя угловыми степенями подвижности.

В полуавтоматическом режиме осуществляется интерактивное управление, при котором оператор использует готовые управляющие подпрограммы, оперативно выбирая и последовательно вводя их в действие в ходе выполнения конкретного задания.

В полностью автоматическом режиме управление производится без участия оператора, за которым, однако, сохраняется функция контроля с возможностью вмешательства в любой момент в ход выполнения программы.

Основные функции системы манипуляторов многоразового космического корабля определяются назначением последнего для транспортировки грузов в своем грузовом отсеке с Земли на околоземную орбиту и обратно. Соответственно, с помощью манипуляторов должны осуществляться следующие операции:

выемка грузов из грузового отсека и перенос их в сторону от корабля;

манипулирование этими грузами с целью их пристыковывания к другим объектам или развертывания (раскрытия) для самостоятельной работы на орбите (ИСЗ, антенные системы, солнечные батареи и т. п.);

захват свободнолетающих объектов и укладка их в грузовой отсек;

инспекция космических объектов, находящихся на околоземной орбите;

сборочно-монтажные и ремонтные работы с объектами на околоземной орбите.

Большие перспективы имеет создание космических роботов для исследования и освоения Луны, планет солнечной системы и более дальних космических объектов. Первыми реальными случаями такого применения средств робототехники являются манипуляторы для взятия проб грунта на советских и американских космических кораблях, осуществивших посадку на Луну, Марс и Венеру. Впереди создание космических роботов с искусственным интеллектом, которые явятся основным средством не только изучения, но и промышленного освоения космоса. Космос — та область применения робототехники, где уже сегодня практически требуются интеллектуальные роботы, способные автономно функционировать, выполняя самые разнообразные и в том числе непредвиденные действия в заранее неизвестной обстановке. Помимо принципиальной возможности решения такой задачи с помощью роботов здесь особенно важна еще способность последних к взаимно- и саморемонту. Это уникальное качество роботов позволяет неограниченно увеличивать их ресурс и надежность (за счет введения определенной избыточности, включая запасные части, и т. п.). При этом важно, что данное свойство в значительной степени распространяется и на объекты, в состав которых они входят.

11.4. ПОДВОДНЫЕ РОБОТЫ

Исследование и освоение глубин океана и морского дна — еще одна важная сфера применения робототехники, перспективность которой, аналогично космосу, связана прежде всего с тяжелыми и опасными для человека внешними условиями. Следствием последних является также низкая эффективность работы водолазов.

Назначение подводных роботов аналогично назначению роботов космических (см. параграф 11.3). По способу передвижения подводные роботы делятся на плавающие и передвигающиеся по грунту.

В зависимости от характера связи с кораблем различаются подводные роботы автономные и привязные (связанные с кораблем тросом-кабелем). В последнем случае такой робот состоит из двух частей — надводной и подводной. При этом по соединяющему эти части тросу-кабелю осуществляются энергопитание подводной части и двусторонняя информационная связь. С целью максимально облегчить подводную часть все функции по оперативной обработке информации, необходимой для деятельности робота, по возможности поручаются его надводной части (насколько это допускает пропускная способность соединяющего кабеля).

Подводные роботы состоят в общем случае из тех же функциональных частей, что и космические роботы: движители, манипуляторы, системы управления ими, навигационная система и система связи. Задача управления движением подводного робота осложняется

ограниченными возможностями подводного телевидения, что повышает роль локационных средств (главным образом ультразвуковых).

В настоящее время в мире созданы более 100 различного назначения подводных аппаратов, снабженных манипуляторами. В подавляющем большинстве используются манипуляторы с ручным или автоматизированным управлением непосредственно с борта аппарата, если он обитает, или дистанционно с надводного корабля. В последнем случае для сокращения объема информации, которой обменивается оператор с местным устройством управления манипулятора, основными способами управления являются супервизорный и интерактивный (см. параграф 5.3) [28].

На рис. 1.8 показан один из первых отечественных исследовательских подводных роботов «Мантa». Робот снабжен двумя гидравлическими манипуляторами грузоподъемностью 50 кг с семью степенями подвижности.

На рис. 11.11 приведена структурная схема системы управления роботов этого типа. В состав системы входят пульт управления с устройством целеуказания на телеэкране и бортовой вычислитель на базе мини-ЭВМ. Бортовой вычислитель обеспечивает автономное выполнение роботом следующих директив оператора в супервизорном режиме управления:

- взять указанный оператором на телеэкране объект;
- перенести этот объект ближе к телекамере, положить в бункер или в любую заданную на телеэкране точку пространства;
- искать объект вслепую (на ощупь) в заданном квадрате (в случае потери видимости из-за замутнения воды и других причин).

В этом режиме обеспечивается автоматический обход манипулятором встречающихся препятствий.

Примером подводных роботов, передвигающихся по дну, являются роботы на гусеничном ходу, используемые для работ по подъему затонувших кораблей. Подводные роботы применяют для очистки и окраски подводной части кораблей. Робот удерживается на обшивке корабля электромагнитами.

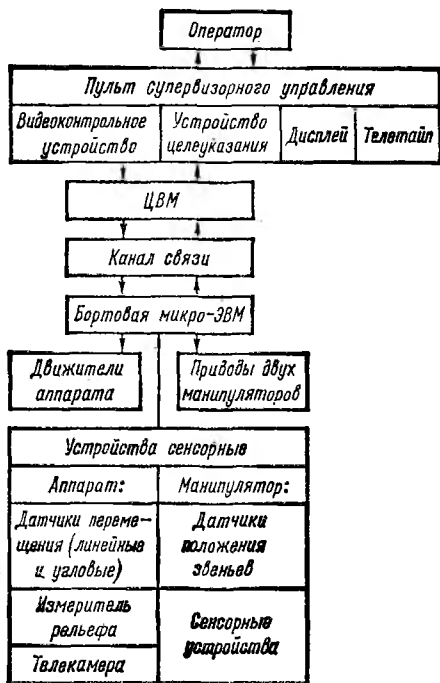


Рис. 11.11. Структурная схема системы управления подводного робота типа «Мантa»



Рис. 11.12. Подвижный робот РАМ (США) на гусеничном ходу для передвижения по грунту

На рис. 11.12 показан подводный робот РАМ с манипулятором длиной 4 м. Управление роботом и его электропитание осуществляются с корабля-матки по кабелю длиной до 8 км.

11.5 ШАГАЮЩИЕ МАШИНЫ

Создание шагающих машин — это специальный раздел робототехники, посвященный в отличие от других его разделов реализации не манипуляционных действий, а способа передвижения шаганием. Предназначенные для этого механические ноги в отличие от механических рук — манипуляторов называются соответственно манипуляторами (от латинского *pes* — нога).

Способ передвижения с помощью ног, как известно, является наиболее распространенным в живой природе. Однако в технике он еще не получил практического применения прежде всего из-за сложности управления. Развитие робототехники создало необходимую научно-техническую основу для реализации этого принципиально нового в технике способа передвижения и для создания соответствующего нового типа транспортных машин — шагающих.

Шагающий способ представляет основной интерес для движения по заранее неподготовленной местности с препятствиями. Традиционные колесные и гусеничные транспортные машины оставляют при этом за собой непрерывную колею, тратя на это значительно большую энергию, чем в случае передвижения шагами, когда взаимодействие с грунтом происходит только в местах упора стопы. Помимо большей экономичности шагающий способ передвижения обладает и большей проходимостью на пересеченной местности вплоть до возможности передвигаться прыжками, лазать по поверхности с любым

наклоном и т. п. При шагающем способе меньше разрушается грунт, что, например, важно при передвижении в тундре.

При передвижении по достаточно гладкой и подготовленной поверхности шагающий способ уступает колесному в экономичности, по скорости передвижения и простоте управления.

В общем случае шагающая транспортная машина состоит из следующих частей: несущей платформы (корпуса); системы энергоснабжения; системы передвижения, состоящей из механических ног — педипуляторов с приводами степеней подвижности; системы управления; информационной системы; системы связи с оператором.

В задачи системы управления входят: стабилизация положения корпуса машины в пространстве на определенной высоте от грунта в процессе ее движения независимо от рельефа местности;

обеспечение движения по заданному (или выбранному) маршруту с обходом препятствий;

связанное управление ногами, реализующее определенную походку с коррекцией в зависимости от рельефа местности.

Задача информационной системы — обеспечение системы управления информацией об окружающей среде, необходимой для выполнения перечисленных выше задач навигации, ориентации и управления движением ног с учетом особенностей рельефа.

Поскольку основное назначение шагающих машин — передвижение по сильно пересеченной местности, управление ими обязательно должно быть адаптивным. В системе управления при этом различаются обычно следующие три уровня управления:

первый, нижний (динамический), уровень управления приводами отдельных степеней подвижности ног;

второй (алгоритмический) уровень построения походки, т. е. координации движения ног, со стабилизацией при этом положения корпуса машины в пространстве;

третий уровень формирования типа походки, направления и скорости движения исходя из заданного маршрута в целом.

Первый и второй уровни должны реализовываться автоматически, а третий уровень может осуществляться и человеком-оператором («водителем» машины) полностью или в режиме супервизорного управления.

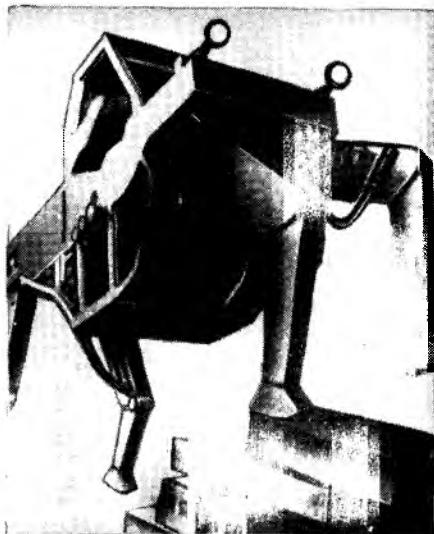


Рис. 11.13. Грузовая шагающая платформа фирмы «Дженерал электрик»

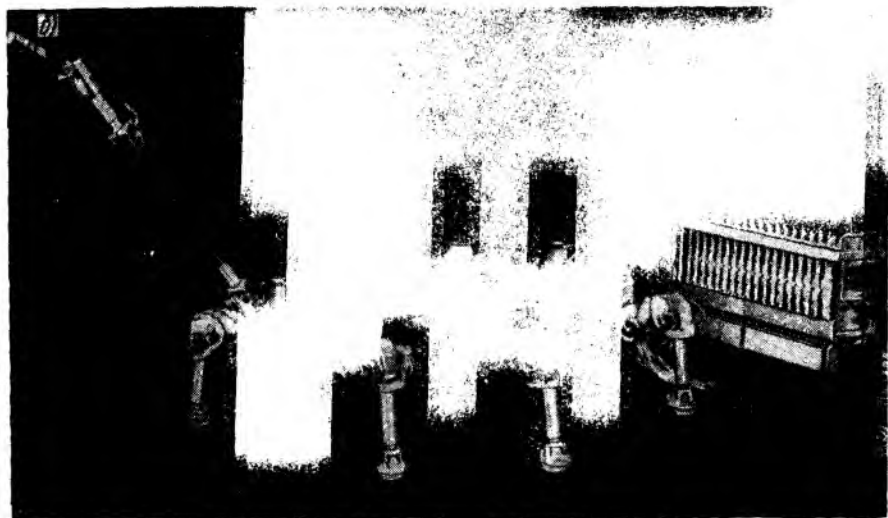
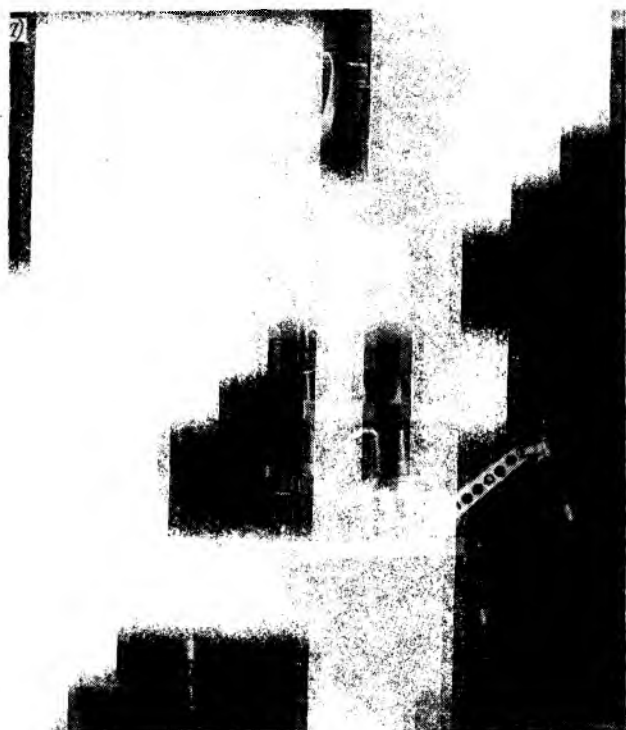


Рис. 11.14. Макеты шестиногих шагающих аппаратов: *а* — Института прикладной математики им. М. В. Келдыша Академии наук СССР; *б* — Института механики МГУ и Института проблем передачи информации Академии наук СССР

Попытки создать шагающие аппараты предпринимались давно. Одна из первых моделей «стопходящей» машины была создана в прошлом веке математиком и механиком П. Л. Чебышевым.

На рис. 11.13 показан опытный образец «шагающего» грузовика фирмы «Дженерал электрик» грузоподъемностью около 500 кг. Четыре гидравлические ноги машины управлялись водителем-оператором с помощью рук и ног; передними ногами машины оператор управлял с помощью двух рукояток руками, а задними — ногами с помощью двух педалей. Машина развивала скорость до 10 км/ч, могла преодолевать серьезные препятствия, например ходить по лестнице.

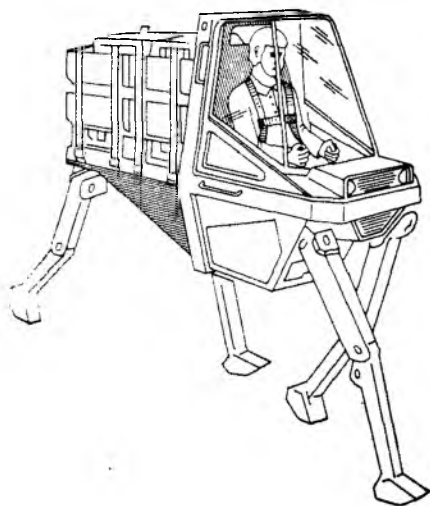


Рис. 11.15. Четырехногий транспортный робот для внутрицеховых работ

На рис. 11.14, а показан макет шагающего робота, разработанного в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша Академии наук СССР совместно с Ленинградским механическим институтом, а на рис. 11.14, б — макет шагающего аппарата с супервизорной системой управления, разработанного Институтом механики МГУ и Институтом проблем передачи информации Академии наук СССР.

На рис. 11.15 представлен четырехногий транспортный промышленный робот, разработанный в США для внутрицеховых работ, в частности, в металлургии. Грузоподъемность робота — 300 кг, программирование — методом обучения. Для этого в передней части робота предусмотрено место оператора.

Хотя, как уже упоминалось, в чистом виде шагающий способ передвижения еще не получил практического применения на транспорте вследствие его сложности, в комбинации с другими более традиционными способами он уже используется. В тяжелых шагающих экскаваторах применяется комбинация способа передвижения шагающим с опорой на грунт днищем корпуса машины. Реализована также комбинация колесного и шагающего способов в так называемых колесно-шагающих транспортных машинах [27]. 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. 11.16 показан опытный образец такой транспортной машины (США) [27].



Рис. 11.16. Экспериментальный образец колесно-шагающей машины с четырьмя колесами (США)

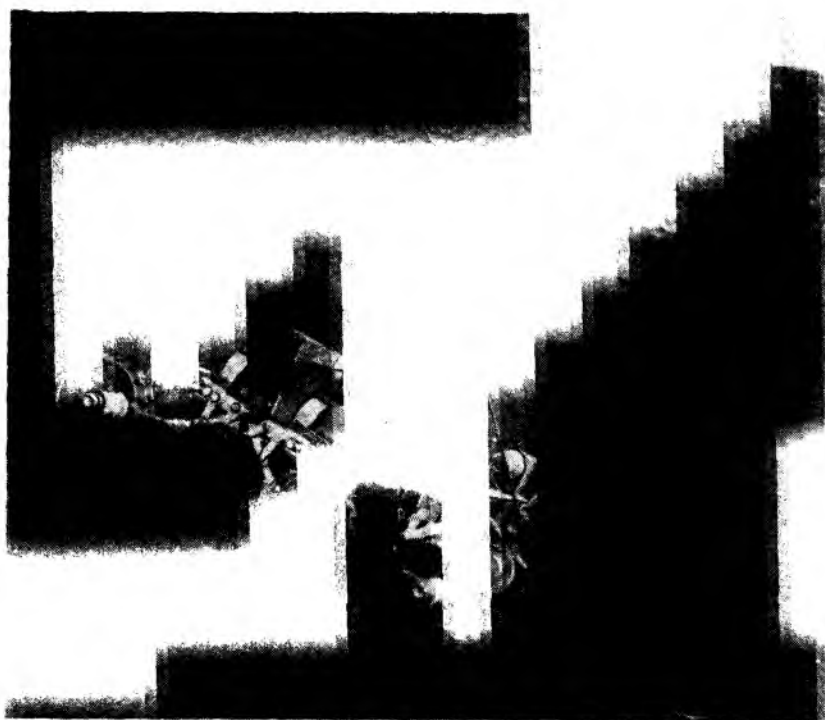


Рис. 11.17. Экспериментальный образец отечественной колесно-шагающей машины с шестью колесами

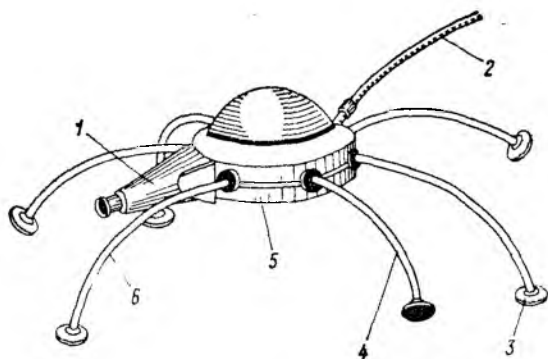


Рис. 11.18. Шестиногая шагающая транспортная машина с приклеиваемыми стопами ног:

1 — телевизионная камера; 2 — шланг питания и управления; 3 — стопа ноги, в которую подается клейкая жидкость; 4 — одна из поднятых ног; 5 — корпус; 6 — одна из приклеенных ног

Во втором варианте оба режима — качения и шагания — 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. На рис. 11.17 показан экспериментальный образец отечественной колесно-шагающей транспортной машины с шестью колесами такого типа [27].

Ведутся научно-исследовательские работы по созданию шагающих машин, способных перемещаться подобно мухе по вертикальным поверхностям и поверхностям, расположенным под любым углом к горизонту, вплоть до движения «вниз головой». На рис. 11.18 показан проект подобной шестиногой шагающей машины объединения «Энергия». Для сцепления с поверхностью используется клейкая жидкость, которая практически мгновенно затвердевает под действием электрического или магнитного поля. Шесть ног робота образуют две группы по три шага. Каждая группа имеет по два привода, осуществляющих подъем (относительно корпуса робота) и перемещение вдоль поверхности в направлении движения. Благодаря симметрии конструкции робот может передвигаться в любом направлении без поворота корпуса. Для обеспечения сцепления ног с поверхностью могут использоваться и более традиционные средства, такие, например, как электромагниты и пневматические присоски.

12.1. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ

Рассмотрение вопроса об эффективности и, соответственно, перспективности какого-либо нового научно-технического направления или принципиально нового вида техники необходимо начинать с сопоставления его с основными целями нашего социалистического 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 полуавтоматического оборудования, повышая производительность, резко ослабляет творческий характер труда, тем самым вступая в противоречие с конечной целью социалистического общества. Эту сторону технического прогресса необходимо заранее представлять и оценивать, принимая решение о развитии работ в новых направлениях.

Как известно, основная целевая функция социалистического производства заключается в наиболее полном удовлетворении материальных и духовных потребностей общества, а основным средством достижения этой цели является повышение эффективности производства.

Однако рост эффективности производства наталкивается на ряд ограничений и противоречий. Одним из таких ограничений является проблема трудовых ресурсов. В настоящее время сокращается приток рабочей силы в производство. В результате многие отрасли и регионы должны развиваться при сокращающейся численности рабочих и служащих. Эта тенденция усугубляется еще тем принципиальным обстоятельством, что в целях реализации целевой функции социалистического производства, направленной на всестороннее развитие личности, требуется расширение фонда свободного времени. Только при этом условии могут происходить реальное развитие потребностей и их удовлетворение. Именно свободное время основоположники научного коммунизма считали действительным мерилем богатства общества.

Социалистическое общество стоит перед необходимостью неуклонно развивать материальное производство при ограниченных и сокращающихся трудовых ресурсах. Отсюда следует, что магист-

ральным направлением является последовательное внедрение процессов, которые позволяют получать требуемые результаты при минимальном числе работников.

Сложные и противоречивые процессы происходят в самом производстве. По мере повышения зрелости социалистического общества усиливается процесс превращения труда в потребность человека. Для этого трудовой процесс должен быть интеллектуально насыщенным, содержательным. Соответственно, следует устранить все, что ведет к однообразию и монотонности труда, делает его тяжелым и малосодержательным. Однако объективная необходимость в повышении производительности труда нередко вызывает противоположные тенденции, что особенно проявляется при глубокой специализации трудовых операций, характерной, например, для конвейера.

Организация производства на конвейере ведет к такой дифференциации трудовых операций, при которой работающий выполняет 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 с использованием промышленных роботов, что позволяет вообще исключить труд человека при их выполнении.

Другим фактором, обостряющим противоречие между усилением творческого характера труда и сохранением (в ряде случаев даже расширением) видов деятельности, лишенных творческого содержания и требующих больших физических усилий, является изменение состава трудовых ресурсов вследствие роста образовательного уровня людей. Это, естественно, повышает требования к условиям и характеру труда. Сегодняшнюю молодежь не может привлечь лишенный творческого подхода ручной труд. Это не компенсируется даже повышенной заработной платой.

Итак, рост производительности труда и, соответственно, расширение объема производимых материальных благ и совокупного продукта в целом в ряде случаев ведут к обеднению содержания труда в том случае, если они происходят в рамках традиционных научно-технических решений. Подобный результат находится в противоречии с целевой функцией социалистического производства и с теми социально-экономическими требованиями, которые предъявляет общество к развитию производства. Ведь сами материальные блага, рост их объема — не самоцель, а лишь средство всестороннего развития личности. И всякая однобокость, односторонность (а утрата творческого содержания труда означает эту однобокость) в развитии личности неприемлема для социалистического общества.

Выход из указанного противоречия заключается в переходе к принципиально новым техническим решениям, позволяющим освободить человека от однообразных, физически тяжелых и лишенных интеллектуального содержания операций.

Дальнейший рост общественного производства на основе использования достижений современной науки и техники связан и с дру-

гими ограничениями, которые вызваны ограниченными возможностями человека. Они касаются увеличения интенсивности прохождения технологических процессов, возрастания числа технологических процессов, протекающих в агрессивной и вредной для человека среде (химия, атомная энергетика и др.). Чтобы снять все указанные ограничения, опять-таки необходимо передать часть трудовых операций новым техническим средствам.

Не менее существенные ограничения возникают и в отношении управления качеством производимой продукции, обеспечения стабильности качества. Практика убедительно показала, что в производствах с преобладанием ручного труда невозможно гарантировать стабильно высокое качество продукции.

Таким образом, для реализации целевой функции социалистического производства на современном этапе настоятельно требуется перейти к принципиально новым научно-техническим решениям. Одно из важнейших мест среди них принадлежит широкому внедрению в производство промышленных роботов.

В целом в соответствии с изложенным на современном этапе можно выделить две главные цели научно-технического прогресса: во-первых, рост производительности труда и эффективности производства; во-вторых, интеллектуализация труда, обогащение его содержания, создание предпосылок для превращения труда в потребность. И как показано выше, в достижении обеих указанных целей важная роль отводится роботизации производства.

При этом важно подчеркнуть, что роботизация способствует преодолению одного из серьезных указанных выше противоречий современного производства между растущей специализацией трудовых операций как условия повышения производительности труда и необходимостью усиления содержательности и творческого характера труда. Одним из важнейших социальных результатов роботизации производства является также создание предпосылок для преодоления различий между умственным и физическим трудом в сфере материального производства.

С помощью ряда косвенных мер — путем совершенствования механизма распределения по труду, ликвидации разрыва в уровне образования, сближения бытовых условий и т. п. — эти различия можно ослабить. Однако основное различие, которое заключается в различном содержании трудовой деятельности, такими мерами устранить невозможно. Для этого опять-таки необходима радикальная перестройка технического базиса общественного производства, перестройка, имеющая своим результатом исчезновение самой категории нетворческого физического труда как особого рода профессиональной деятельности.

Материальные предпосылки для устранения такого физического труда создаются в процессе комплексной автоматизации производства. Роботизация, рассматриваемая как одно из ключевых направлений комплексной автоматизации производства, способствует, с одной стороны, устранению главных и решающих различий между социальными слоями и группами — по содержанию трудовой дея-

тельности. С другой стороны, как упоминалось выше, роботизация является необходимым условием радикального повышения производительности труда и сокращения на этой основе продолжительности рабочего времени. Это не только расширяет поле для развития многообразных потребностей человека, но и служит предпосылкой участия всех и каждого в управлении производством и общественными делами.

Конечно, полная реализация этих процессов — дело будущего. Но ведь и сама роботизация производства как одно из важнейших направлений происходящей ныне научно-технической революции находится лишь в самом начале пути. Однако это не должно мешать видеть ее возможности и перспективы, те огромные социальные последствия, которые возникают при ее широком и полном развитии [1].

Рассмотрев основные задачи и назначения робототехники в развитии социалистического производства на современном этапе, перейдем к особенностям оценки эффективности применения промышленных роботов в народном хозяйстве.

Результаты анализа областей использования ПР в различных отраслях промышленности и типах производства, изучение перспектив применения роботов в зависимости от серийности выпускаемой продукции показывают, что ПР могут быть эффективно применимы в условиях как мелкосерийного, так и массового производства.

В массовом и крупносерийном производстве с быстрой сменой объекта производства (автомобилестроение, радиопромышленность, производство электробытовых приборов и т. п.) перспективным является использование ПР для обслуживания агрегатных станков и переналаживаемых автоматических линий на операциях загрузки-выгрузки технологического оборудования на начальных и конечных позициях линий, для внутрицехового транспортирования. Применение промышленных роботов позволяет осуществить комплектацию и запуск таких линий в более короткие сроки, повысить обратимость оборудования.

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 полностью решить на базе групповой организации производства проблему изготовления изделий малыми партиями.

В любой области применения необходимо рассматривать ПР как элемент всего производственного комплекса, включающего другое основное и вспомогательное технологическое оборудование, объеди-

ненное 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 улучшение 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 использования оборудования обусловлено увеличением времени его работы. В условиях роботизации это обеспечивается сокращением различного рода потерь рабочего времени и повышением сменности работы оборудования. Как известно, низкая сменность работы оборудования в целом ряде случаев объясняется прежде всего недостатком рабочей силы.

Обследование предприятий машиностроения показало, что внутрисменные простои из-за отсутствия рабочих составляют в среднем 12—23 %, а целосменные простои по этой же причине — 33—47 % (большее значение относится к металлорежущим станкам). Применение роботов позволяет значительно снизить простои оборудования.

Снижение брака продукции является следствием устранения влияния таких индивидуальных и субъективных факторов, как квалификация, опыт, утомляемость рабочего, его состояние.

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 значительному увеличению годового эффективного фонда времени работы оборудования в результате использования ПР.

Значение этих факторов выходит за рамки отдельного предприятия, и основой решения проблемы дефицита рабочих в народном хозяйстве в целом является прежде всего сокращение занятости их на вспомогательных операциях.

Увеличение объема производства в условиях роботизации приводит к снижению себестоимости продукции в результате уменьшения доли условно-постоянных накладных расходов на единицу продукции, сокращения непроизводительных расходов, таких, как оплата сверхурочных работ, оплата простоев рабочих, снижение потерь от брака, а также удельных затрат по содержанию и эксплуатации оборудования. Снижение себестоимости продукции достигается за счет экономии заработной платы рабочих, высвобождаемых абсолютно и относительно. (Зарубежные специалисты считают, что

эта составляющая является самой значительной при оценке экономической эффективности ПР. В частности, в США и Швеции при оценке эффективности ПР на первое место ставят количество высвобождаемых рабочих и уровень их заработной платы.) Экономия на заработной плате образуется также вследствие опережающего темпа повышения производительности труда по сравнению с темпом роста заработной платы.

Применение ПР 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 ПР в конкретном РТК необходимо провести комплексный технико-экономический анализ с учетом технических параметров всех агрегатов, входящих в РТК, основных характеристик и особенностей технологического процесса, частных организационных и технико-экономических показателей, а также социальной значимости роботизации данного процесса. В целом объектами такого анализа должны послужить:

- рабочее оборудование, на котором выполняются операции технологического процесса;

- промышленные 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;

- постоянный гарантийный ремонтный запас деталей и элементов, требуемый для нормальной эксплуатации комплекса;

- устройства обеспечения других необходимых условий нормальной эксплуатации комплекса (вентиляционные, защитные и др.);

- система управления комплексом в целом;

- производственные площади, занимаемые комплексом;

- прочие возможные элементы, которые выявляют при изучении материального состава комплекса как объекта экономического анализа.

Все расчеты экономического характера для оценки целесообразности и эффективности применения ПР следует выполнять с учетом этого полного состава объекта исследования.

Кроме того, необходимо особо отметить, что одним из важных факторов, который следует учитывать при экономическом обосновании роботизации, является надежность. Недостаточная надежность технических устройств роботизированного 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 смысле структуры роботизируемого

комплекса. Например, чем универсальнее робот, тем он сложнее и менее надежен. В то же время использование в составе роботизируемого технологического комплекса более простых и дешевых, но менее универсальных ПР приводит к необходимости включать в состав РТК дополнительное специальное оборудование и приспособления, компенсирующие снижение функциональных возможностей ПР. Проектирование и изготовление такого специального оборудования связаны с дополнительными затратами, а его размещение приводит, как правило, к увеличению производственных площадей, занимаемых комплексом.

Каждому сочетанию технических средств РТК в свою очередь соответствует вполне определенный состав системы управления. Различными будут для рассматриваемых вариантов как капитальные, так и эксплуатационные затраты на весь срок службы комплекса. В связи с этим возникает задача по определению такого состава технических устройств, входящих в РТК, и соответствующего программного обеспечения, который дает минимум затрат на его проектирование, изготовление и эксплуатацию за весь срок службы комплекса.

Проводимые в нашей стране исследования социальных аспектов роботизации производственных процессов, связанных с улучшением условий труда, ликвидацией тяжелых, опасных и вредных для здоровья трудящихся видов работ, с повышением общей культуры производства, показали, что ряд важных социальных последствий роботизации могут и должны быть количественно измерены и учтены в расчетах экономической эффективности применения ПР. Например, установлено, что с внедрением роботов на производстве уменьшается текучесть кадров. Это позволяет снизить дополнительные затраты на восполнение недостатка в рабочих. Как показывают результаты анализа, ущерб от текучести кадров образуется вследствие недополучения предприятием продукции в течение примерно последних двух недель работы увольняющихся работников, выработка которых в это время снижается в среднем на 20 %, а также в результате того, что выработка принятых рабочих в течение первых 1—3 мес работы тоже оказывается сниженной не менее чем на 20 % в зависимости от их специальности и стажа. Кроме того, текучесть кадров обуславливает дополнительные затраты на организацию работы по приему и увольнению, на подготовку кадров, строительство дополнительных объектов жилищно-бытового и социально-культурного назначения.

Необходимо учитывать также, что роботизация позволяет уменьшить количество профессиональных заболеваний, снизить травматизм на производстве, сократить затраты на лечение и мероприятия по охране труда и технике безопасности.

До последнего времени изменение затрат, определяемых всеми этими факторами, не учитывали в экономических расчетах. Однако учет социальных факторов в расчетах позволяет значительно более точно определять области эффективного применения ПР в условиях социалистического способа производства.

Из изложенного видно, что развитие и углубление комплексной автоматизации производственных процессов на базе применения ПР с созданием роботизированных участков, линий и цехов сопровождаются значительными экономическими и социальными последствиями, учесть которые, однако, весьма затруднительно. С одной стороны, это связано с тем, что расчетные задачи становятся все более многовариантными при одновременном увеличении числа факторов, которые необходимо учитывать. С другой стороны, целый ряд подлежащих учету факторов носит вероятностный характер, что определяет степень экономического и социального риска принимаемых решений. Необходимо также принимать во внимание, что в случае рассматриваемой гибкой автоматизации экономическое обоснование должно не только носить характер разового расчета, как это обычно наблюдается в настоящее время, но и обеспечивать возможность постоянного оперативного экономического анализа для оценки экономических последствий изменения любого технологического или технического параметра либо их совокупности в ходе эксплуатации комплекса. В связи с этим созданные ранее методы экономического обоснования технических решений, которые успешно применяются в промышленности для оценки экономической эффективности сравнительно простых вариантов новой техники и технологии, оказались не пригодными для обоснования вариантов такой комплексной автоматизации производственных процессов с применением ПР. Поэтому в соответствии с комплексной программой работ по робототехнике Госкомитета СССР по науке и технике была разработана специальная межотраслевая методика оценки экономической эффективности ПР как при их создании, так и при использовании в составе РТК [16]. Методика позволяет оценить основные составляющие эффективности, включая рост производительности, сокращение численности работающих, снижение себестоимости, уменьшение объема незавершенной продукции, и определить по ним суммарный экономический эффект в рублях и срок окупаемости.

Экономическую эффективность создания и применения ПР и РТК оценивают по годовому экономическому эффекту, который представляет собой экономию приведенных годовых затрат, получаемую в результате использования данного ПР в составе определенного РТК или РТК в целом. Эту экономию определяют из сравнения предлагаемого (нового) варианта с базовым. В качестве базового варианта при создании ПР и РТК принимается лучший отечественный аналог или зарубежный, который может быть приобретен в необходимом количестве или воспроизведен на основе лицензии. При использовании ПР и РТК в качестве базового варианта берется существующий до этого времени вариант (роботизированный, автоматизированный с помощью других средств или неавтоматизированный).

Приведенные годовые затраты на реализацию рассматриваемого варианта ПР или РТК:

$$З = С + E_n K, \quad (12.1)$$

где C — себестоимость; $E_n K$ — нормативная прибыль; $E_n = 0,15$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат; K — капитальные затраты.

Себестоимость C — это себестоимость продукции, выпускаемой по данному варианту в расчете на ее годовой выпуск. В нее входят следующие слагаемые: годовые эксплуатационные издержки потребителя при эксплуатации рассматриваемого варианта, включая зарплату (со всеми начислениями), затраты на подготовку и возобновление управляющих программ, а также годовые затраты на амортизацию оборудования и приспособлений и их ремонт. Амортизационные отчисления в среднем составляют 10—20 %.

Капитальные затраты K складываются из следующих составляющих: балансовая стоимость оборудования; затраты на его доставку и установку; стоимость помещений, занимаемых этим оборудованием, и служебно-бытовых помещений; оборотные средства в незавершенном производстве; стоимость специальных приспособлений и управляющих программ; затраты на проектные работы; стоимость жилищного и культурно-бытового строительства.

Годовой экономический эффект для рассматриваемого варианта ПР или РТК определяется, как упоминалось выше, разностью приведенных годовых затрат для этого и базового вариантов:

$$\mathcal{E} = \Delta Z + \Delta Z_c, \quad (12.2)$$

где $\Delta Z = \alpha_{12} Z_1 - Z_2$; индексы 1 и 2 относятся соответственно к базовому и новому вариантам; Z_1 и Z_2 определяются по формуле (12.1); α_{12} — коэффициент, учитывающий различия сравниваемых вариантов по объему производства, производительности, сроку службы оборудования и равный произведению отношений этих величин для каждого из вариантов.

Величина ΔZ_c в формуле (12.2) определяет разницу в расходах, обусловленных временной и стойкой нетрудоспособностью, травматизмом, текучестью кадров, потерями рабочего времени из-за прогулов и на отпуска, браком и недостаточной производительностью вследствие утомляемости рабочих и их нехватки, затратами на дополнительных рабочих в связи с отсутствием необходимых средств автоматизации, доплатами, связанными с неоптимальными условиями труда. В первом приближении можно принять [31]

$$\Delta Z_c = (0,17 \div 0,26) C \approx 0,2C. \quad (12.3)$$

Кроме перечисленных расходов, связанных с условиями труда, которые учитываются в формуле (12.2) и покрываются каждым предприятием самостоятельно, часть расходов на воспроизводство трудовых ресурсов производится государством. В первом приближении эти расходы можно учесть увеличением зарплаты, умножив ее на коэффициент начислений на зарплату, который принимается постоянным в пределах пятилетки и равным 1,4 [31].

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений $\Delta K = K_2 - K_1$, требуемых для реализации рассматриваемого варианта ПР или РТК, можно определить по формуле

$$T_{o.н} = \Delta K / \Delta C,$$

где $\Delta C = C_1 - C_2$; значение индексов здесь то же, что и в формуле (12.2).

Нормативный срок окупаемости новой техники равен 6, 7 лет. Фактическое значение этой величины для отечественных ПР и РТК лежит в пределах 2,5—6 лет. Наряду с рассмотренной выше задачей определения сравнительной экономической эффективности вариантов ПР и РТК применение ПР связано с решением целого ряда важных комплексных задач. К ним относятся:

- определение областей экономически эффективного использования ПР для действующих и проектируемых предприятий;

- разработка организационно-экономических основ построения роботизированного производства;

- создание и обоснование новых типовых производственных структур на базе использования ПР;

- прогнозирование потребности и определение масштабов и размещения производства ПР;

- изучение и прогнозирование изменения квалификационного состава рабочих и ИТР на предприятиях, использующих ПР, определение структуры кадров, организация подготовки специалистов новых профессий;

- исследование влияния роботизации на сокращение текучести кадров, профессиональных заболеваний и т. д.

В области роботостроения к таким социально-экономическим проблемам относятся:

- разработка экономического обоснования гамм типоразмеров ПР;

- определение экономически обоснованных типажей ПР и их унифицированных компонентов;

- экономическое обоснование технического уровня и надежности ПР и РТК.

Разработка перечисленных проблем является достаточно сложным делом, однако их решение необходимо как для обоснованного определения путей развития отечественной робототехники в целом, так и при решении задач автоматизации конкретных производств [22].

12.2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В РОБОТОТЕХНИКЕ

В проблеме безопасности труда при использовании роботов можно выделить следующие два аспекта:

- применение роботов как средства повышения безопасности производства;

- обеспечение безопасности при эксплуатации самих роботов.

Первый аспект является основным и по существу соответствует одному из первоочередных назначений роботов — высвобождение людей от травмоопасного, вредного и тяжелого физического труда. Сегодня при планировании внедрения роботов в производство такого рода технологические операции получают приоритет, и именно на таких операциях роботы внедряют наиболее успешно.

В машиностроении к этим операциям относятся, в частности, обслуживание кузнечно-прессового оборудования и металлорежу-

щих 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, погрузо-разгрузочные и транспортные работы.

В машиностроительных отраслях такими операциями являются установка крепи в забое, обслуживание отбойных и бурильных агрегатов, подборка в горнодобывающей и угольной промышленности, обслуживание оборудования и фасовка продукции во вредной для здоровья атмосфере в химической и нефтехимической промышленности, различные манипуляционные операции в металлургической промышленности, атомной энергетике и других производствах в экстремальных условиях (вредные излучения, взрывоопасность, предельные температуры, загазованность, запыленность и т. п.).

В нашей стране накоплен определенный положительный опыт повышения безопасности труда с помощью роботов прежде всего в машиностроении и металлообработке (на штамповке, в гальваническом производстве, в производстве пластмассовых изделий, на термообработке, погрузо-разгрузочных и транспортно-складских операциях).

В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 11 июня 1981 г. с 1986 г. будет запрещена поставка машин и оборудования, работа на которых является монотонной, травмоопасной, тяжелой и вредной для здоровья человека, без оснащения их роботами и другими средствами механизации и автоматизации. Перечни таких машин и оборудования должны быть разработаны и утверждены министерствами-изготовителями по согласованию с Минздравом СССР, ВЦСПС, Государственным комитетом СССР по труду и социальным вопросам, Государственным комитетом СССР по науке и технике и основными министерствами-потребителями.

Для реализации рассматриваемой проблемы предстоит существенно расширить номенклатуру роботов. Недостаточно, в частности, номенклатура роботов в пыле- и теплозащитном, пожаро- и взрывобезопасном исполнении, роботов для сварки, пайки и окраски, для работы в других экстремальных и вредных условиях. Отсутствуют роботы для выполнения операций обрубки отливок, зачистки, ряда операций в горячей штамповке, ковке, дробеструйной обработке, термообработке (закалка в соляных ваннах), для сортировки из навала, погрузо-разгрузочных работ. Во многих случаях это объясняется тем, что на данных операциях требуются роботы с развитым адаптивным управлением, в том числе с техническим зрением.

Второй названный выше аспект робототехники с точки зрения безопасности труда — это обеспечение безопасной работы самих роботов, которые при определенных условиях могут представлять собой источник повышенной опасности для человека, а также для работающего вместе с ними технологического оборудования.

Опыт свидетельствует о возможности несчастных случаев, в том числе со смертельным исходом, при работе с роботами. В Японии,

где применение роботов достигло наибольших размеров, по данным статистики почти каждый третий рабочий так или иначе сталкивался с опасностью, создаваемой роботами.

В основном такая опасность вызывается следующими причинами: неисправность собственно робота из-за нарушения его механической прочности и кинематики или отказов в системе управления; ошибки программирования и настройки, вследствие чего при эксплуатации возможны непредвиденные движения с выходом из огражденной рабочей зоны или механические повреждения робота; 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.).

Одним из источников аварийных ситуаций, вызванных неправильными действиями персонала, являются медико-биологические и нервно-эмоциональные факторы, возникающие при работе с роботами. Особенно это относится к наладочным и настроечным работам, когда человек находится в рабочей зоне включенного робота. Статистика показывает, что большая часть несчастных случаев с обслуживающим персоналом связана именно с нахождением 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 регламентируются соответствующими нормативно-техническими документами, а также специальными документами по технике безопасности в робототехнике.

В соответствии с программой комплексной стандартизации промышленных роботов Госстандарта (см. параграф 7.3) в 1982 г. выпущен ГОСТ 12.2.072—82 «Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы и участки. Общие требования безопасности». Аналогичные стандарты существуют в ГДР и Японии.

В ГОСТ 12.2.072—82 включены требования к конструкции ПР, к организации РТК и эксплуатации ПР и РТК.

К ПР, в частности, предъявляются следующие требования:

ПР, предназначенные для работы в неблагоприятных условиях, должны иметь соответствующее защитное исполнение;

захватное устройство ПР должно удерживать объект манипулирования при отключении питания;

если при программировании и наладке ПР требуется пребывание персонала в рабочей зоне ПР, то в этих режимах должно быть предусмотрено снижение скорости его исполнительных устройств до 0,3 м/с;

пульт управления ПР должен выдавать информацию о режиме работы ПР, срабатывании блокировок ПР и работающего с ним технологического оборудования, наличии сбоя в работе ПР, начале движения ПР.

В ГОСТе даны также требования к предохранительным, блокирующим и защитным устройствам, которыми должны быть оснащены ПР. При этом указанные средства не должны ограничивать технологических возможностей ПР и удобства их обслуживания.

Применительно к организации РТК регламентированы:

необходимость комплексной автоматизации всех основных и вспомогательных операций с допустимостью сохранения за оператором в основном только некоторых функций управления и контроля; наличие в РТК блокирующих устройств и ограждений, требования к ним;

планировка РТК с учетом размеров рабочей зоны ПР;

требования к организации рабочих мест операторов, к пультам управления и расположенным в других местах РТК дополнительным органам аварийного отключения.

Применительно к эксплуатации ПР и РТК разработаны:

требования, предъявляемые к обслуживающему персоналу, и перечень их 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.

В ГОСТе установлены безопасные приемы и методы работы с ПР, а также порядок организации контроля за соблюдением техники безопасности при работе с ПР со стороны администрации.

Для обеспечения безопасности роботизированных производств перед всеми отраслями народного хозяйства поставлены следующие первоочередные задачи:

на основании анализа технологических процессов и оборудования разработать перечень операций, которые прежде всего необходимо автоматизировать с помощью роботов; в соответствии с этим перечнем предусмотреть работы по созданию и организации производства требуемых для этого роботов и типовых роботизированных технологических ячеек;

провести комплексные исследования условий безопасности роботизированных технологических комплексов с целью научного обоснования требований техники безопасности к роботам, их испытаниям, установке и эксплуатации в составе технологических комплексов.

Приложение 1

Основные этапы развития движений в живой природе

В табл. П.1.1 [11] приведены основные этапы эволюции движения, начиная с первых возникших на Земле живых организмов и кончая человеком.

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 т. п.), возникли сенсорные клетки — рецепторы. Внутренние клетки, развив способность сокращаться, превратились в мышечные. В результате возникли первые еще беспорядочные рефлекторные движения как реакция на внешние воздействия. Необходимая для этого связь между рецепторными и мышечными клетками была сперва реализована химическим путем (с помощью специальных веществ — медиаторов), а затем с помощью электрических сигналов. Последнее позволило повысить быстродействие, хотя в начале 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 всех частей тела, в результате чего появился такой центр управления, как головной мозг, задачами которого стали собирать информацию от рецепторов, обрабатывать ее и на этой основе вырабатывать сигналы управления мышцами, т. е. движением тела, как реакцию на зарегистрированные внешние раздражения.

Следующий этапный момент в развитии движения животных — появление поперечнополосатой мышцы, которая в сотни и тысячи раз мощнее и динамичнее, чем ранее возникшая гладкая мышца.

С созданием такого мощного двигателя потребовался жесткий скелет (до этого все живые существа были мягкотелыми). Эволюция пошла здесь двумя путями: 1) наружный скелет в виде панциря, состоящий из отдельных пластинок, соединенных внутри мышцами, у членистоногих; 2) скелет из костей расположен внутри, а соединяющие их мышцы — снаружи у хордовых (позвоночных). Второй путь был сложнее первого, так как помимо собственно движения тела требовались еще поддержание позы и устойчивость тела. Однако именно этот путь обеспечил возможность реализовать значительно более сложные, быстрые и точные движения. В связи с этим, если первый путь завершился на насекомых, то второй привел к млекопитающим и человеку.

Появление поперечнополосатой мышцы и жесткого скелета привело к дальнейшему совершенствованию управления движением путем развития оперативной сенсорной коррекции движений в функции от текущей информации о внешней среде,

П.1.1. Этапы эволюции развития движений в живой природе

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Зарождение живой клетки в океане Специализация клеток у многоклеточных с возникновением рецепторных, мышечных, а затем и нейронных клеток, осуществляющих связь между клетками, которая привела к возникновению рефлекторности Формирование головы с ртом и развитие на ней телерецепторов, ориентированных на внешнюю среду, и, соответственно, появление возможности целенаправленного движения всего тела в сторону определенных объектов внешней среды, т. е. локомотий Головной мозг как центр координированного управления движением всех частей тела Поперечнополосатая мышца и скелет, сперва наружный Внутренний скелет — основа дальнейшего совершенствования двигательных способностей 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 Экстрапирамидная двигательная система — иерархическая система управления движением, включающая как древние нижние уровни сегментарного управления туловищем, так и новые уровни управления конечностями, развившиеся в головном мозгу и совершенствующиеся у пресмыкающихся, а затем у птиц. У последних эта иерархическая система рефлекторного управления, т. е. инстинктивного, без обучения, достигла наибольшего совершенства. Развился мозжечок, обеспечивающий координацию движений, равновесие 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 являлся базой для освоения новых более совершенных (по сложности, быстроте действия, точности) движений и развития самообучения как основы уже не инстинктивного, а разумного поведения	Одноклеточные Губки Черви Высшие моллюски (осьминоги, каракатицы и др.) Членистоногие (ракообразные и др.) Рыбы и далее все другие хордовые (позвоночные) Земноводные Земноводные, пресмыкающиеся, птицы Млекопитающие	1 млрд. 800 млн. 500 млн. 100 млн.

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Рука для манипуляций в процессе трудовой деятельности человека с использованием орудий труда. В результате развилась современная кора полушарий головного мозга	Человек, орудия труда	3 млн.
Робот выступает как качественно новый тип орудия труда, который, взаимодействуя с другими машинами и другими орудиями труда, реализует вместо человека трудовой процесс и принципиально способен лучше человека осуществлять необходимые для этого манипуляции и локомоции, а в перспективе иметь интеллектуальное управление, включая подобно человеку способность к самообучению и самоусовершенствованию	Специализация людей в трудовом процессе Системы «человек-машина», а затем «человек-робот-машина»	2 млн. 20—25

т. е. адаптивного управления. Это в свою очередь вызвало дальнейшее совершенствование головного мозга.

Следующий 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 импульсами 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 них осталась в зачаточном состоянии.

Следующим качественным 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 качественно новый тип управления — интеллектуальное (разумное) управление, основанное на обучении на основании наблюдений, собственного опыта и выработки соответствующих новых алгоритмов поведения. Это достижение принадлежит млекопитающим.

Ниже приведены основные типы локомоций, возникших в живом мире в процессе его эволюции.

1. В воде.

1.1. Передвижение по дну:

путем подтягивания конца туловища к голове, затем перемещения 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 (каракатницы, гребешки).

1.3. Гребки хвостом у рака.

1.4. Плавание рыб за счет волнообразных изгибаний тела и использования парных плавников как рулей глубины.

1.5. Плавание на поверхности воды (животные).

1.6. Передвижение по поверхности воды (коллемболы и некоторые другие насекомые).

2. В воздухе.

2.1. Махание крыльями (птицы).

2.2. Планирование.

2.3. Парашютирование.

3. Под землей.

3.1. Путем раздвижения (уплотнения) земли (червь расширяет всунутую в землю голову).

3.2. Путем выбрасывания земли назад (кроты, мыши и др.).

4. По земле.

4.1. Ползание (змеи и др.).

4.2. Лазание.

4.3. Хождение (с использованием разного количества ног).

4.4. Прыгание (на двух и четырех конечностях).

4.5. Бег симметричный, несимметричный, прыжковый, галоп и т. д. (с использованием разного количества конечностей).

И наконец, последним этапом эволюции движения в живом мире явилось развитие у человека манипуляционных способностей в процессе трудовой деятельности, универсальным средством для чего стали руки. С этого момента в 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 вплоть до автоматического оборудования.

Последним этапом этого процесса явилось создание заменяющих человека роботов как универсальных устройств для манипуляционных (и локомоторных) действий в общественном производстве. Таким образом, дальнейшее совершенствование манипуляционных движений будет происходить уже в результате развития робототехники с преодолением, соответственно, тех принципиальных ограничений, которые присущи человеку и живой природе в целом.

Приложение 2

Общая схема системы управления движением человека

На рис. П.2.1 показана обобщенная функциональная схема систем управления движениями тела человека, в которую входят пассивная часть системы — *скелет*, ее активная (движущая) часть — *мышцы*, чувствительные (сенсорные) устройства — *рецепторы* и информационно-управляющая система — *центральная нервная система* (ЦНС).

Скелет (его часть, которая участвует в движении) представляет собой вместе с мышцами объект управления в виде подвижно соединенных костных звеньев, образующих с позиций механики многозвенные кинематические цепи, подобные манипуляторам роботов.

Основные назначения этих систем — поддержание позы, ориентация (на объекты внешней среды), перемещение в пространстве, локомоция и, наконец, главное с точки зрения интересов робототехники — манипуляция.

Нейроны. Рассмотрим составные части схемы на рис. П.2.1. «Элементной базой» ее устройства управления являются нервные клетки — нейроны. Существует много типов их, специализирующихся на восприятии внешней информации, ее преобразовании, хранении, передаче и, наконец, воздействии на мышцы и железы. В организме человека миллиарды нейронов, которые соединены в нейронную сеть, охватывающую все тело.

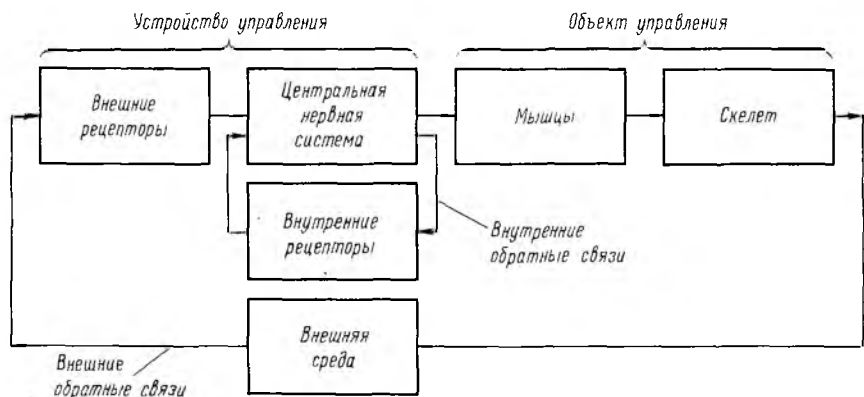


Рис. П.2.1. Функциональная схема системы управления движениями тела человека

Нейрон (рис. П.2.2) состоит из тела нейрона (*сомы*), *дендритов* — отростков, которые воспринимают входные воздействия от других нейронов, и *аксонов* — ветвящихся отростков, которые передают выходные воздействия другим нейронам и различным клеткам. Аксоны заканчиваются концевыми утолщениями — *синапсами* на дендритах других клеток. Длина отдельных аксонов соизмерима с размерами тела человека (например, аксонов, идущих от спинного мозга до большого пальца ноги). Один нейрон может иметь тысячи входов от других нейронов и сотни выходов (и, соответственно, синапсов).

Сигналы по аксонам передаются в виде электрических импульсов со скоростью 50—70 м/с. Входы нейрона имеют определенный порог чувствительности, при превышении которого он возбуждается. После этого требуется определенное время для возвращения нейрона в исходное состояние. Это так называемый рефлексный период, в течение которого происходит химическое восстановление соответствующего аксона после проведения им очередного импульса. Нейрон может возбуждаться одним большим импульсом, который превышает порог чувствительности, или совокупностью нескольких малых импульсов, которые поступают на один или разные входы за время, меньше рефлексного периода, и в сумме превысят этот порог. Возбудившись, нейрон генерирует выходные сигналы в свои аксоны.

Входной сигнал воздействует на клетку, изменяя потенциал ее мембраны. При этом он может как увеличить этот потенциал, возбуждая клетку, так и уменьшить его, осуществляя ее торможение.

Таким образом, нейрон осуществляет пространственно-временное алгебраическое суммирование входных сигналов, восстанавливает их интенсивность, выдавая

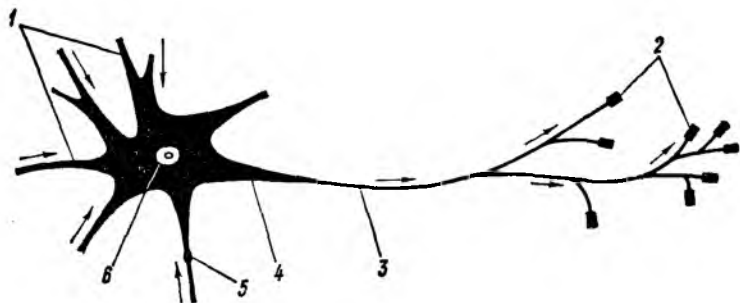


Рис. П.2.2. Строение нейрона:

1 — дендриты; 2 — синапсы; 3 — аксон; 4 — аксонный холмик; 5 — синапс другой клетки; 6 — тело клетки

выходные сигналы определенной интенсивности, размножает выходные сигналы и передает их через свои аксоны другим клеткам.

Мышцы. Как было указано выше, тело человека приводится в движение с помощью *поперечнополосатых мышц*. Их основу составляет так называемый анизотропный элемент (диск) в виде круглой пластинки размером в красное кровяное тельце. Под действием управляющего сигнала этот элемент резко сокращается (в течение около 1 мс). После этого для возврата в исходное состояние ему требуется примерно вдвое-втрое больше времени. Таким образом, он представляет собой импульсный элемент со значительным мертвым временем.

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

Цепочки анизотропных и изотропных элементов образуют *волокна*. Из этих волокон, объединенных в *пучки* по 10—15 волокон, и состоит мышца.

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

быстросокаращающиеся и развивающие большое усилие, но быстроутомляющиеся волокна;

быстросокаращающиеся, но развивающие меньшее усилие, зато более выносливые волокна;

медленносокращающиеся и развивающие небольшое усилие, но наиболее выносливые волокна.

В одном пучке могут находиться волокна разных типов.

В целом время сокращения волокон лежит в пределах 10—200 мс, а развиваемое ими усилие — от 0,1 до 100 г.

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 может входить от нескольких единиц до тысяч однотипных волокон.

Благодаря двигательным единицам, подчиненным одному мотонейрону в разных пучках мышцы, один мотонейрон может привести в действие всю мышцу, создавая усилие, определяемое количеством и типом подчиненных ему волокон. При этом чем тоньше совершаемые мышцей движения, тем меньшее число волокон приходится на один мотонейрон.

Усилие, развиваемое мышцей в целом, определяется общим количеством введенных в действие волокон, а необходимая плавность движения обеспечивается путем включения в действие в ходе выполнения движения все новых волокон. Управление мышцей осуществляется сериями импульсов следующих от мотонейронов с частотой 50—200 импульсов в секунду.

В зависимости от количественного соотношения входящих в мышцу волокон разных типов получаются соответственно мышцы разного типа от быстродействующих до медленнодействующих, но зато более выносливых.

Таким образом, в целом мышца — это сложный состав двигателя, состоящий из большого числа (до нескольких тысяч) параллельно включенных элементарных импульсных двигателей — волокон, «конструктивно» объединенных в пучки, а по управлению — в двигательные единицы. Требуемое изменение во времени мышечного усилия обеспечивается при этом путем последовательного включения в определенные моменты времени различного числа двигательных единиц разных типов.

На рис. П.2.3 показана типичная зависимость силы, развиваемой мышцей, от скорости движения [39]. Здесь f , v и u — относительные значения (отношения абсолютного значения к максимальному) соответственно силы, скорости и управляющего воздействия, которое определяет возбуждение мышцы, а k — коэффициент, принятый равным 5.

Мощность, развиваемая мышцей человека, при постоянном управляющем воздействии максимальна при средних значениях силы и скорости и падает до нуля при

максимальном значении каждой из этих величин (см. на рис. П. 2.3 штриховую кривую, соответствующую постоянному значению мощности). Среднее значение мощности, развиваемой мышцей человека, составляет около 20 Вт. При этом, как видно из изложенного, поперечнополосатая мышца — это двигатель одностороннего (нереверсивного) действия, т. е. по внешнему сигналу она может только сокращаться, создавая усилие в одном направлении. Поэтому мышцы крепятся к костям (сухожилиям) по балансной схеме, образуя пары противоположно действующих мышц — *антагонистов* (рис. П. 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.

Рецепторы. Рецепторы — чувствительные (сенсорные) устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в соответствии с характером собираемой ими информации. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Внешние рецепторы — это прежде всего пять основных органов чувств (зрение, слух, осязание, обоняние, вкус), а также множество таких рецепторов, как расположенные в коже температурные рецепторы, рецепторы давления, болевые и др. Кроме того, сюда относится вестибулярный аппарат в височной кости, который подобно гироскопу определяет положение тела в пространстве и ускорение.

Особенностью этих органов чувств является предварительная обработка в них информации до передачи ее в головной мозг, к чему мы вернемся после рассмотрения устройства центральной нервной системы.

Внутренние рецепторы (интероцепторы) дают информацию о состоянии двигательного аппарата, а также желез и внутренних органов. Интересующие нас рецепторы первого типа делятся на мышечные, сухожильные и механорецепторы суставов и кожи.

Мышечные рецепторы размещены в мышце и дают информацию о длине мышцы и ее первой производной, *сухожильные* — об усилии и его первой производной, *суставные* — о значении суставного угла и двух его производных.

Мышечные рецепторы устроены следующим образом. В мышце помимо основных (силовых) мышечных волокон, называемых экстрафузальными, которые были рассмотрены выше, имеются мелкие (информационные) волокна, называемые интрафузальными. Длина этих волокон изменяется вместе с экстрафузальными волокнами и измеряется с помощью расположенных в них особых рецепторов, называемых мышечными веретенами. Информация от них передается затем в спинной мозг в виде отклонения длины мышцы от заданного ее значения («уставки»), полученного управляющими этой мышцей мотонейронами спинного мозга. Для определения этого отклонения наряду с основными мотонейронами, называемыми *α-мотонейронами*, имеются специальные мотонейроны — *γ-мотонейроны*, которые управляют интрафузальными волокнами по сигналам, поступающим на них одновременно с сигналами, идущими к *α-мотонейронам*.

Центральная нервная система. Устройство центральной нервной системы показано на рис. П. 2.5, а, б, а ее состав

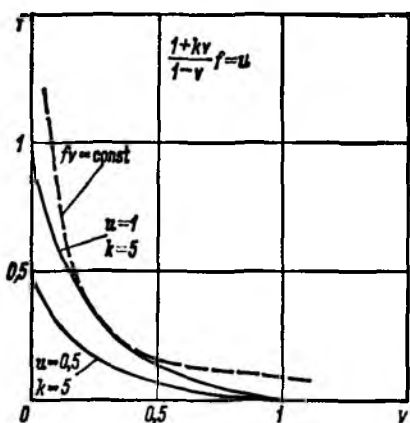


Рис. П.2.3. Зависимость силы, развиваемой мышцей человека, от скорости движения

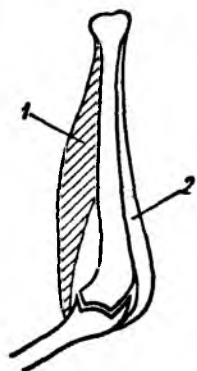


Рис. П.2.4. Крепление мышц-антагонистов:

1 — мышца-сгибатель; 2 — мышца-разгибатель

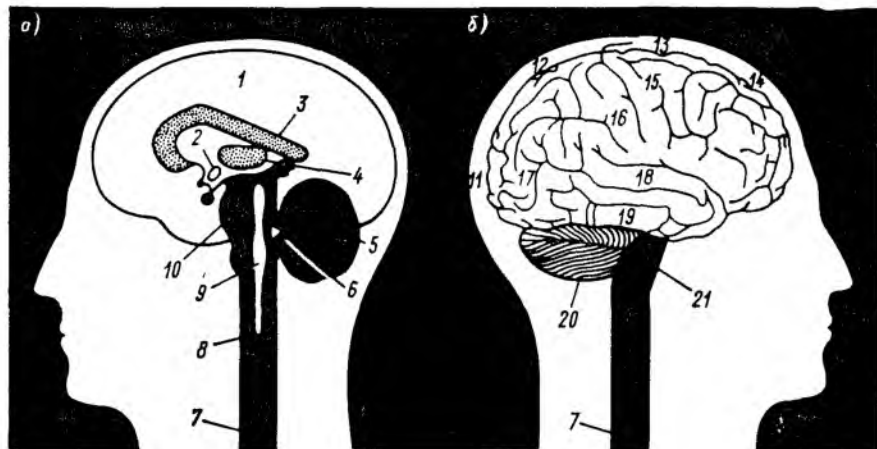


Рис. П.2.5. Устройство центральной нервной системы: *а* — срединный разрез мозга; *б* — общий вид мозга после удаления черепа:

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

дан на рис. П.2.6. Центральная нервная система состоит из головного и спинного мозга. Головной мозг в свою очередь включает передний мозг и ствол мозга. Их состав показан на рис. П.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** входят большие полушария, включая «новую кору», которая у человека превосходит всю остальную часть мозга и имеет толщину всего 60—100 нейронов. Чтобы поместиться в черепе, она имеет складки (борозды). Соединены полушария мозолистым телом и другими нервными путями. В каждом полушарии различают четыре доли: лобную, височную, теменную и затылочную. В коре имеется сенсорная область, которая состоит из связанных сенсорных областей (соматосенсорной, получающей информацию от внутренних рецепторов, зрительной, слуховой и обонятельной) и моторной области.

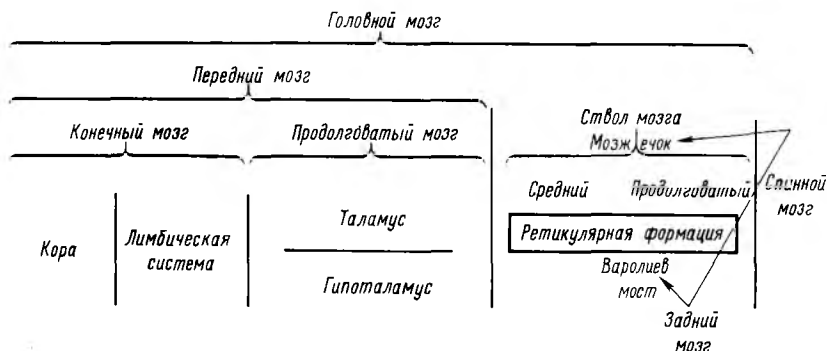


Рис. П.2.6. Состав центральной нервной системы

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

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 обратно («вниз») моторной информации. *Гипоталамус* вместе с лимбической системой определяет эмоциональное и мотивационное поведение (кроме того, здесь контролируются биохимические процессы — солевой обмен, кровяное давление, дыхание, температура, водный баланс, чувства голода и насыщения, эндокринная система).

Ствол мозга управляет зрительными, слуховыми и двигательными рефлексам. Через ствол мозга проходят вверх и вниз пути, связанные с рефлекторной 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, т. е. компенсацию влияния силы тяжести.

Мозжечок вместе с варолиевым мостом образует 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 сенсорные нервные клетки и управляющие мышцами мотонейроны. Сегменты соединены нервными волокнами, которые идут вверх и вниз вдоль спинного мозга.

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

На рис. П.2.7 приведена схема зрительной системы. Импульсы светочувствительных клеток сетчатки глаза (палочек и колбочек) предварительно преобразовываются двумя последующими слоями клеток сетчатки (ганглиозными клетками) и по зрительному нерву, образованному аксонами этих клеток, идут в мозг. При этом, как показано на рис. П.2.7, глаза соединены с полушариями мозга перекрестно. Поступает зрительная информация в два адреса: во-первых, по более древнему пути — в средний мозг (тектум), где одна используется для ориентации (поворота головы, туловища и самих глаз); во-вторых, — через таламус, где осуществляется еще одна ее предварительная обработка, в зрительную область коры (в задней части головы). При хорошей освещенности скорость передачи зрительной информации, по-видимому, выше, чем с телевизионного экрана, но меньше, чем в кино, и достигает 10^9 бит/с [39].

В результате предварительной обработки зрительной информации в сетчатке глаза ганглиозными клетками ее объем уменьшается на два порядка. Эта обработка имеет целью выявить те особенности внешней среды, которые наиболее существенны для формирования поведения и, в частности, оперативной реакции организма на различные изменения внешней среды. Так, например, у лягушки имеются четыре типа ганглиозных клеток, ориентированных соответственно на выявление границы

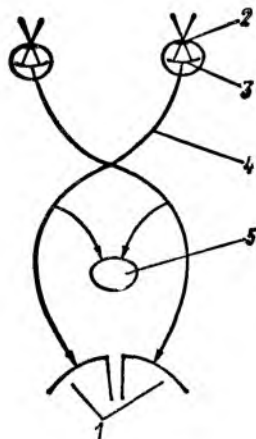


Рис. П.2.7. Схема зрительной системы:

1 — хрусталик; 2 — сетчатка; 3 — зрительный нерв; 4 — верхнее двухолмие (тектум)

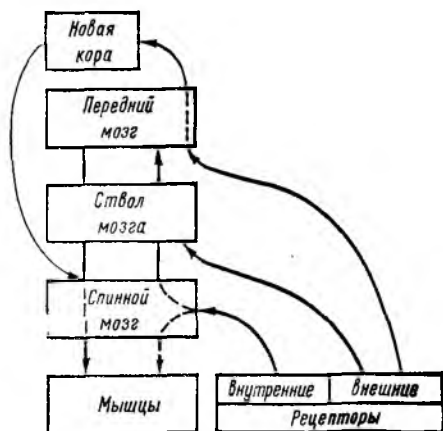


Рис. П.2.8. Многоконтурная система управления движением человека

в зрительной коре мозга, воспроизводя там уже не копию реальной внешней среды в виде поля распределения по сетчатке света и тени, а непрерывно получаемую из нее данного типа ганглиозными клетками пространственно-временную картину соответствующих признаков. У лягушки, например, в соответствии с количеством типов ганглиозных клеток сетчатки в мозгу имеются четыре слоя клеток, которые расположены так, что их точки, соответствующие одному месту сетчатки, расположены друг под другом.

Однако если у лягушки уже в глазу зрительная информация преобразуется в форму, готовую для выполнения на ее основе конкретных действий, то у более развитых животных полученная от глаз зрительная информация носит более общий характер и требует последующей обработки. При этом представление о внешнем мире с позиций возможных реакций организма формируется на более высоком уровне на основе сопоставления наряду со зрительной и других видов сенсорной информации.

Уже у кошки в мозгу имеются специализированные слои клеток, выявляющих контуры объектов (как границы света и тени) и определяющих значения углов в местах изменения направления контурных линий [4].

Аналогично устроена слуховая система. Она содержит два уха (с улиткой с чувствительными волосковыми клетками во внутреннем ухе), слуховой нерв, который идет тоже перекрестно к слуховой области коры с промежуточным преобразованием (в нижнем двухолмии). Одновременно на втором более древнем пути информация от обоих ушей объединяется (в верхней olive) для определения направления на источник звука.

Итак, мы рассмотрели устройство составных частей системы управления движением человека, показанной на рис. П. 2.1. С учетом изложенного эта система представлена на рис. П. 2.8 в более подробном виде с выделением отдельных частей центральной нервной системы. На этой схеме показаны три основные цепи управления (см. параграф 2.2):

управление мышцами на основе внутренних обратных связей от внутренних рецепторов (толстые штриховые линии);
экстрапирамидный путь управления (толстые сплошные линии);

пирамидный (новый) путь (тонкие сплошные линии). (В последнем контуре для простоты не показан еще один сенсорный путь к новой коре, идущий через мозжечок и передний мозг.)

света и тени, движущейся такой границы, темных мест и выпуклого края темного предмета («детектор насекомого»). Все эти признаки наиболее важны для лягушки при ловле насекомых и для укрытия от опасности. (Лягушка ловит только движущиеся цели определенных размеров, а от больших движущихся объектов убегает в тень). У других животных в соответствии с особенностью их поведения ганглиозные клетки специализированы на выявление других признаков. Например, у кошки, которая, охотясь, долго следит за своей жертвой, готовясь к прыжку, важную роль играют ганглиозные клетки, ориентированные на усиление контрастности изображения.

Ганглиозные клетки разных типов равномерно распределены по всей сетчатке. Аксоны каждого типа этих клеток идут к отдельному слою клеток

1. Абалкин Л. И., Камаев В. Д., Юревич Е. И. Автоматические манипуляторы (промышленные роботы) в народном хозяйстве: социально-экономические аспекты/Под ред. И. Ф. Образцова. М.: Знание, 1980. 80 с.
2. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии. М.: Наука, 1968. 911 с.
3. Амосов Н. М. Алгоритмы разума. Киев: Наукова думка, 1979. 223 с.
4. Арбиб М. Метафорический мозг. М.: Мир, 1976. 295 с.
5. Батуев А. С., Таиров О. П. Мозг и организация движений: Концептуальные модели. Л.: Наука, 1978. 139 с.
6. Белянин П. Н. Промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1975. 398 с.
7. Бергольд Н. Н. Основной курс теоретической механики. Ч. 4. М.: Наука, 1966. 334 с.
8. Бернштейн Н. А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 256 с.
9. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы: М. Мир, 1976. 541 с.
10. Газзе-Райпорт М. Г. Автоматы и живые организмы. М.: Наука, 1961. 244 с.
11. Грэхем И. Ф., Рэвайндрен Р., Кнапп К. Состояние разработки, перспективы развития космических манипуляторов с дистанционным управлением. — Астронавтика и ракетодинамика, М.: ВИНТИ, 1980, № 10, с. 1—11.
12. Динамика управления роботами/В. В. Козлов, В. П. Макарычев, А. В. Тимофеев и др.; Под ред. Е. И. Юревича. М.: Наука, 1984. 334 с.
13. Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы/Под ред. Е. П. Попова, М. Б. Игнатьева. М.: Мир, 1976. 462 с.
14. Довбня Н. М., Юревич Е. И. К вопросу об исследовании динамики многосвязанных систем управления роботами с помощью ЦВМ. — В кн.: Робототехника. Л., 1981, с. 27—33.
15. Довбня Н. М., Юревич Е. И. Принципы построения и этапы проектирования роботизированных технологических комплексов. — В кн.: Исследование робототехнических систем и их очувствления. М., 1983, с. 211—216.
16. Инструкция по оценке экономической эффективности создания и использования автоматических манипуляторов с программным управлением (промышленных роботов). М.: ЭНИМС, 1982. 102 с.
17. Интегральные роботы: Сб. статей/Под ред. Е. Поздняка. М.: Мир, 1973, вып. 1. 421 с.
18. То же, 1975, вып. 2. 528 с.
19. Иоффе Б. А., Калнинь Р. К. Ориентирование деталей электромагнитным полем. Рига: Зенатне, 1972. 300 с.
20. Катус Г. П. Визуальная информация и зрение роботов. М.: Энергия, 1979. 176 с.
21. Козлов В. В., Тимофеев А. В., Юревич Е. И. Построение и стабилизация программных движений автоматического манипулятора с электрическими приводами. — В кн.: Робототехника, Л., 1979, с. 76—86.
22. Козловский В. А. Организационные и экономические вопросы построения производственных систем. Л.: ЛГУ, 1981. 216 с.
23. Козлов Ю. М., Майоров А. П., Хорошавин Ю. П. Алгоритмы нижнего уровня управления «грубой» интегрального робота. — В кн.: Теория, принципы устройства и применения роботов и манипуляторов. Л., 1974, с. 176—178.
24. Макет глубоководного манипулятора, управляемого вычислительной ма-

щиной/И. А. Вол, М. Б. Игнатьев, Ю. С. Калинин и др. — В кн.: Теория и устройство манипуляторов. М., 1973. 250 с.

25. Модульные устройства управления типа ЕСМ для промышленных роботов/Ю. Д. Андрианов, Е. В. Гречанов, Н. С. Телешев и др. — В кн.: Промышленные роботы. Л., 1984, вып. 4, с. 17—22.

26. Переналаживаемые сборочные автоматы/Под ред. В. А. Якимовича. Киев: Техника, 1979. 176 с.

27. Планетоходы/Под ред. А. Л. Кемурджяна. М.: Машиностроение, 1982. 319 с.

28. Подводные роботы/Под ред. В. С. Ястребова. Л.: Судостроение, 1977. 365 с.

29. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М.: Наука, 1976. 103 с.

30. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 398 с.

31. Промышленная робототехника/Под ред. Я. А. Шифрига. М.: Машиностроение, 1982. 415 с.

32. Ступин К. Н., Телешев Н. С., Юревич Е. И. Модульный пневматический промышленный робот с позиционным микропроцессорным управлением и техническим зрением. — В кн.: Промышленные роботы и их применение в гибких автоматических производствах. Л., 1982, с. 37—45.

33. Тимофеев А. В., Экало Ю. В. Устойчивость и стабилизация программных движений робота-манипулятора. — Автоматика и телемеханика, 1976, № 10, с. 148—156.

34. Управление роботами от ЭВМ/Е. И. Юревич, С. И. Новаченко, В. А. Павлов и др.; Под ред. Е. И. Юревича. Л.: Энергия, 1980. 261 с.

35. Устройство промышленных роботов/Е. И. Юревич, Б. Г. Аветиков, О. Б. Корытко и др. Л.: Машиностроение, 1980. 339 с.

36. Юревич Е. И. Модульная концепция развития промышленной робототехники. — Технология судостроения, 1982, № 11, с. 9—15.

37. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1975. 413 с.

38. Юревич Е. И., Цветков А. Н., Яценко Ф. Е. Робот для цеховой транспортной системы. — Промышленный транспорт, 1981, № 5, с. 7—8.

39. Янг Дж. Ф. Робототехника/Пер. с англ.; Под ред. М. Б. Игнатьева. Л.: Машиностроение, 1979. 300 с.

40. Sadamoto K. Robots in the Japanese economy. Tokyo: Survey Japan, 1981. 300 p.

41. Warnecke H., Schraft R. Industrial robots — application experience. — Bedford, I. F. S., 1980. 300 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. История развития робототехники	9
1.1. Предыстория робототехники	—
1.2. Возникновение и развитие современной робототехники	11
1.3. Развитие робототехники в СССР	21
Глава 2. Управление движением человека	25
2.1. Постановка задачи	—
2.2. Динамические уровни управления движением	—
Рефлекторное управление отдельным звеном (суставом) (25). Рефлекторное связанное управление несколькими звеньями тела (26). Управление с использованием внешней информации (27)	
2.3. Тактический уровень управления движением	28
2.4. Стратегический уровень управления движением	29
Глава 3. Устройство роботов	32
3.1. Состав, параметры и классификация роботов	—
Состав роботов (32). Классификация роботов по назначению (32). Классификация роботов по показателям, определяющим их конструкцию (33). Классификация роботов по способу управления (34). Классификация роботов по быстрдействию и точности движений (35). Параметры, определяющие технический уровень роботов (36)	
3.2. Манипуляционные устройства роботов	36
3.3. Сбалансированные манипуляторы с ручным управлением	40
3.4. Рабочие органы манипуляторов	42
Захватные устройства (42). Рабочий инструмент (44)	
3.5. Устройства передвижения роботов	45
3.6. Устройства управления роботов	47
3.7. Сенсорные устройства роботов	48
Глава 4. Приводы роботов	60
4.1. Классификация приводов	—
4.2. Пневматические приводы	62
4.3. Гидравлические приводы	70
4.4. Электрические приводы	79
4.5. Комбинированные приводы	84
Глава 5. Системы управления роботами	86
5.1. Системы программного управления	—
Системы циклового управления (90). Системы позиционного управления (93). Системы контурного управления (97)	
5.2. Системы группового управления роботами	97

5.3. Системы адаптивного управления	99
Обобщенная структурная схема системы управления оцувствлен- ным роботом (101). Алгоритмы адаптивного управления (105). Программное обеспечение оцувствленных роботов (108)	
5.4. Системы интеллектуального управления	116
Глава 6. Динамика роботов	121
6.1. Основные принципы организации движения роботов	121
6.2. Основные кинематические соотношения для манипуляторов	124
6.3. Синтез траекторий движения манипуляторов во времени	129
6.4. Математическое описание динамики манипуляторов	133
6.5. Моделирование движений манипуляторов на ЭВМ	138
6.6. Синтез систем управления манипуляторами	140
Глава 7. Унификация и стандартизация в робототехнике	146
7.1. Общие понятия	—
7.2. Унификация	—
Принципы модульного построения механической части роботов (149). Модульный подход к построению устройств управления ро- ботов (152). Модульное построение систем программного обеспе- чения (157). Типы и ряды роботов и роботизированных техноло- гических комплексов (160)	
7.3. Стандартизация	165
Глава 8. Роботизированные технологические комплексы	166
8.1. Классификация роботизированных технологических ком- плексов	—
8.2. Компонировки роботизированных технологических комплексов	170
8.3. Управление роботизированными технологическими ком- плексами	175
8.4. Этапы создания роботизированных технологических ком- плексов	176
8.5. Особенности создания роботизированных технологических комплексов в действующих производствах	180
Применение ПР грузоподъемностью до 1 кг (181). Использование ПР грузоподъемностью в единицы килограмм (до 25 кг) (183). При- менение ПР и манипуляторов грузоподъемностью десятки ки- лограмм и выше (186). Последовательность и общий порядок орга- низации работ по внедрению ПР и манипуляторов на действую- щих производствах (186)	
8.6. Гибкие производственные системы	187
Глава 9. Особенности применения промышленных роботов на основных технологических операциях	194
9.1. Классификация роботизированных технологических комплек- сов, в которых ПР выполняют основные технологические операции	194
9.2. Сборочные роботизированные комплексы	194
9.3. Сварочные роботизированные комплексы	200
9.4. Робототехнические комплексы для нанесения покрытий	200
Глава 10. Особенности применения промышленных роботов на вспомога- тельных операциях	21
10.1. Классификация роботизированных технологических ком- плексов, в которых промышленные роботы выполняют вспомогательные операции	21

10.2. Роботизированные технологические комплексы механообработки	212
10.3. Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки	216
10.4. Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве	219
10.5. Роботизированные технологические комплексы литья под давлением	220
Глава 11. Роботы немашиностроительного применения	223 ^a
11.1. Классификация роботов	—
11.2. Роботы в немашиностроительных отраслях народного хозяйства	—
11.3. Космические роботы	233
11.4. Подводные роботы	236
11.5. Шагающие машины	238
Глава 12. Социально-экономические аспекты робототехники	244
12.1. Особенности определения социально-экономической эффективности средств робототехники	—
12.2. Техника безопасности в робототехнике	253
Приложение 1. Основные этапы развития движений в живой природе	257
Приложение 2. Общая схема системы управления движением человека	260
Нейроны (260). Мышцы (262). Рецепторы (263). Центральная нервная система (263)	
Список литературы	267