

Серия «Высшее образование»

Конюх В.Л.

ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ

Допущено УМО по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 220300 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 220400 «Мехатроника и робототехника»

Ростов-на-Дону
Феникс
2008

УДК 621.861.87(075.8)

ББК 32.816я73

КТК 221

К65

Рецензенты:

автоматизации технологических процессов Кемеровского технологического института пищевой промышленности (заведующий кафедрой кандидат технических наук, доцент А.В. Чупин); доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации исследований и технической кибернетики В.Я. Карташов (Кемеровский государственный университет).

Конюх В.Л.

К65 Основы робототехники / В.Л. Конюх. — Ростов н/Д : Феникс, 2008. — 281 с. — (Высшее образование).

ISBN 978-5-222-12575-5

Рассмотрены технические средства робототехники: история и предпосылки развития роботов, классификация роботов, кинематика манипуляторов, конструкции захватных устройств, приводы звеньев, сбалансированные манипуляторы, транспортные роботы, виды датчиков и управляющих устройств. Описаны способы человеко-машинного, программного, адаптивного и интеллектуального управления роботами. Заключительный раздел пособия посвящен приложениям промышленной робототехники в различных отраслях — от оценки подготовленности технологии к роботизации до обеспечения безопасности и практических примеров применения робототехники.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 220300 — «Автоматизация технологических процессов и производств» и 220400 «Мехатроника и робототехника».

ISBN 978-5-222-12575-5

УДК 621.861.87(075.8)

ББК 32.816я73

© Конюх В.Л., 2008

© ООО «Феникс», оформление, 2008

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. УСТРОЙСТВО РОБОТОВ	10
1.1. Терминология	10
1.2. История робототехники	21
1.3. Кинематика манипуляторов	28
1.4. Захватные устройства	40
1. Зажимные хватные устройства	42
2. Притяжные хватные устройства	45
3. Поддерживающие хватные устройства	47
1.5. Приводы	51
1.6. Сбалансированные манипуляторы	73
1.7. Транспортные роботы	79
Контрольные вопросы	89
2. УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ	92
2.1. Способы и уровни управления	92
2.3. Системы программного управления	107
2.4. Системы адаптивного управления	111
2.5. Роботы с элементами искусственного интеллекта	114
2.6. Средства оцувствления роботов	137
2.6.1. Классификация	137
2.6.2. Датчики положения	140
2.6.3. Измерители перемещений	143
2.6.4. Тактильные датчики	147
2.6.5. Силомоментные датчики	154
2.6.6. Локационные датчики	160
2.6.4. Системы технического зрения	165
2.7. Устройства управления	172
Контрольные вопросы	178

3. ПРИЛОЖЕНИЯ РОБОТОТЕХНИКИ	
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	181
3.1. Подготовка производства	
к применению роботов	181
3.2. Оценка степени изменчивости	
среды функционирования робота	185
3.3. Применение робототехники	
для обслуживания технологического оборудования	191
3.3.1. Структуры роботизированных	
технологических комплексов	191
3.3.2. Холодная листовая штамповка	192
3.3.2. Горячая объемная штамповка	194
3.3.3. Обслуживание металлорежущих станков	194
3.3.4. Обслуживание ванн гальванопокрытий	197
3.3.5. Литейное производство	199
3.4. Вспомогательное оборудование	
роботизированного технологического комплекса	200
3.5. Выполнение роботами технологических	
операций	204
3.5.1. Сварка	205
3.5.2. Окраска	206
3.5.3. Резание материалов	208
3.5.4. Абразивная зачистка поверхностей	210
3.6. Роботизированная сборка	211
3.7. Гибкая производственная система	214
3.8. Робототехника	
для немашиностроительных отраслей	216
3.8.1. Горное дело	217
3.8.2. Металлургия	226
3.8.3. Строительство	226
3.8.4. Подводные работы	227
3.8.5. Сельское хозяйство	228
3.8.6. Легкая промышленность	229
3.8.7. Микроэлектроника	231
3.8.8. Микроробототехника	232
3.8.9. Лабораторные работы	232
3.8.10. Медицина	233
3.8.11. Боевые роботы	233
3.8.12. Обслуживание людей	234
3.8.13. Космическая робототехника	234
3.8.14. Устранение последствий катастроф	235
3.9. Обеспечение безопасности	
применения роботов	236

3.10. Источники эффективности робототехники	239
Повышение производительности оборудования путем увеличения его загрузки	239
Повышение производительности за счет сокращения времени обработки изделия	240
Экономия зарплаты высвобождаемых рабочих	240
Сокращение затрат на жизнеобеспечение рабочих	241
Уменьшение размера оборотных средств в незавершенном производстве	241
Сокращение производственных площадей	242
Снижение потерь от брака	242
Экономия материалов и энергии	242
Выручка от продажи оборудования с ручным управлением	243
Улучшение социальных характеристик труда рабочих	243
Снижение затрат на технологическую подготовку производства	243
Снижение расходов на эксплуатацию и ремонт оборудования	244
Повышение качества продукции за счет стабилизации процессов и исключения влияния субъективного фактора	244
Сокращение потерь на приобретение рабочими опыта	244
Сокращение убытков от несчастных случаев	245
Повторное использование средств робототехники при модернизации производства	245
3.11. Оценка целесообразности применения робототехники	245
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	259
ЗАДАЧИ	263
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	269
ЛИТЕРАТУРА	280

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы в области робототехники произошли значительные изменения:

— начался третий бум промышленной робототехники, связанный с расширением приложений робототехники в космосе, автомобилестроении, строительстве, химии, транспортировании, обороне, образовании, электроснабжении, пищевой промышленности, медицине, текстильной промышленности, металлургии, микроэлектронике и других отраслях;

— развернулось внедрение адаптивных и интеллектуальных роботов, оснащенных системами машинного зрения;

— произошел переход от погрузочно-разгрузочных роботов к роботам, непосредственно выполняющим технологические операции;

— появились способы интеллектуального управления роботами в изменяющейся среде;

— быстро развиваются гибкие производственные системы на базе роботов.

По данным Международной ассоциации промышленных роботов RIA более 50 фирм выпускают роботы, а число предприятий, внедривших роботы, насчитывается тысячами [1]. Выпуск промышленных роботов в России прекращен. Литература по робототехнике на русском языке перестала издаваться, а те материалы, что были опубликованы в 80-х гг., устарели. С другой стороны, стала доступна информация из сети Интернет и зарубежных публикаций.

Тем не менее, назрела необходимость подготовки специалистов, умеющих применять средства робототехники для решения производственных задач. Представленные материалы с 1991 г. проходили апробацию в учебных процессах Кемеровского государственного университета, Кузбасского государственного технического университета. Материал обновлен на

кафедре автоматизации производственных процессов в машиностроении Новосибирского государственного технического университета.

Дополнительная информация получена при посещениях Европейского центра мехатроники (Германия, Аахен), Института мехатроники (Германия, Моерс), международных выставок «ИНТЕРКАМА», «Робототехника» и непосредственно от фирм, разрабатывающих средства робототехники.

Автор признателен зав.кафедрой «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессору А.С. Ющенко за ценные замечания по улучшению пособия.

Вместо описания быстро изменяющихся конструкций роботов основное внимание уделено изложению основных принципов робототехники. Курс «Основы робототехники» был бы неполным без показа реальных средств робототехники. Поэтому одновременно с печатной формой учебного пособия разработан мультимедийный учебно-методический комплекс на компакт-диске, содержащий текст учебного пособия с цветными фотографиями роботов, движущимися иллюстрациями и видеофильмами, показывающими применение роботов в промышленном производстве. В комплекс также включены набор задач с рекомендациями по их решению, лабораторный практикум по имитационному моделированию робототехнических систем на сетях Петри, система компьютерного тестирования знаний и виртуальный практикум «Управление манипуляционным роботом».

ВВЕДЕНИЕ

Применение робототехники в современном промышленном производстве принимает лавинообразный характер. Особенно выгодным становится применять роботов для непосредственной обработки изделий со скоростью и точностью, недостижимыми для традиционных технологий.

В развитии роботизированных технологий можно выделить три этапа. На первом этапе робототехника находит применение в отдельных процессах, таких как сварка, перемещение раскаленных и тяжелых предметов, работа в горячих цехах и на участках с агрессивной средой. Второй этап характеризуется совершенствованием приемов и методов роботизированного производства. Разрабатываются новые виды датчиков, системы адаптивного и интеллектуального управления. Рамки ориентированных на человека технологий становятся тесными для новых возможностей роботов. Начинается перестройка организационной структуры производства. Появляются гибкие производственные системы и заводы-автоматы. На третьем этапе развития формируются новые направления и области применения робототехники — работа в космосе и на других планетах, под водой, в медицине, в сфере обслуживания.

Становится ясно, что промышленная робототехника представляет собой основу современного производства. Способность роботов выполнять разнообразные операции по задаваемым программам, а также автоматизированные системы планирования и организации работы оборудования составляют основу гибкой автоматизации производства. Так, уменьшение размеров и разнообразие электронных плат уже не позволяет изготавливать их без установки деталей роботом. Возможности прогрессивных технологий производства, таких как резание материалов тонкой водяной струей

высокого давления или стабильная дуговая сварка, ранее не использовались из-за ограничений по психофизиологическим свойствам человека, однако стали реализовываться с появлением робототехники.

Предметом изучения основ робототехники являются конструкции и технологическое применение промышленных роботов, способы управления робототехническими системами, принципы построения гибких производственных систем на основе робототехники [2]. Робототехника включает такие разделы как сенсорная техника, манипуляторы, мобильные машины, адаптивное управление, искусственный интеллект, информатика, бионика. Ее теоретическую основу составляют два направления: синтез многофункциональных механических устройств и управление ими с помощью встраиваемых управляющих систем реального времени. Они объединяются в новое направление — мехатронику [3]. Этот термин означает механику, управляемую электроникой.

1. УСТРОЙСТВО РОБОТОВ

1.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Робот представляет собой многофункциональное механическое устройство с изменяемой программой функционирования, способное перепрограммироваться на различные действия. От других механических устройств он отличается совокупностью двух свойств:

- универсальная механическая база;
- перепрограммируемая система управления приводами перемещений.

Универсальной механической базой робота может быть манипулятор, представляющий собой разомкнутую последовательность звеньев, начало которой закреплено на основании, а конец перемещается в пространстве (рис. 1.1). В соединениях звеньев имеются приводы для поступательного или вращательного перемещений звеньев друг относительно друга.

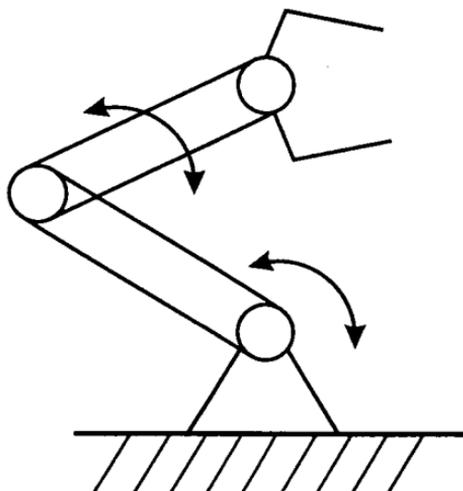


Рис. 1.1. Манипулятор

При взаимных перемещениях звеньев свободный конец манипулятора с закрепленным на нем рабочим органом выводится в разные точки пространства. Рабочий орган манипуляционного робота представляет собой захватное устройство или инструмент для непосредственного выполнения технологических операций. У транспортных роботов рабочим органом является грузонесущая платформа, у информационных роботов — устройство получения информации. При решении разных задач можно изменять перемещения рабочего органа в пространстве, изменяя программу в системе управления.

Специалисты решили не вводить стандартное определение понятия «робот», чтобы не ограничивать появление новых форм робототехники. Применяют общие определения:

— программируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный для перемещения материалов, деталей, инструмента или специализированных устройств по переменным программируемым траекториям для выполнения широкого круга задач (Американская ассоциация промышленной робототехники);

— механическая система, выполняющая гибкие двигательные функции, аналогичные двигательным функциям живых организмов, или сочетающая такие функции с «разумными» функциями и подчиняющаяся человеческой воле (Японская ассоциация промышленных роботов);

— позиционно-управляемый, перепрограммируемый, многофункциональный манипулятор с несколькими степенями подвижности, способный перемещать материалы, детали, инструмент и предназначенный для выполнения разнообразных задач в процессе осуществления различных программируемых движений (Международная организация по стандартизации);

— устройство, способное самостоятельно перемещаться в пространстве, справляться с задачами ана-

лиза сцен и распознавания образов, обладающее большим числом степеней подвижности, умеющее анализировать обстановку с помощью обратной связи, а также прогнозировать ситуации, опираясь на собственный опыт и доступную информацию (С. Ватаата, Токийский университет);

— устройство, которое обладает универсальностью, мобильностью, представляет собой одно физическое тело, работает автоматически, полностью подчиняется человеку, способно к элементарной интеллектуальной деятельности (С. Мори, Токийский технологический институт);

— устройство, обладающее механической рукой с захватом, системой управления своим перемещением и движением механической руки по заданным или сформированным самостоятельно программам, датчиками среды и состояния робота (М. Шпрингер, Университет Куин Мэри);

— механическое устройство, способное выполнять множество различных операций из числа тех, которые человек выполняет с помощью рук и ног (К. Коэмото);

— механическое устройство, способное при помощи своих органов чувств и разума выполнять какую-либо работу и имеющее внешнее и функциональное сходство с человеком или другими живыми существами (Э. Накано, Университет Хошиба).

Манипуляторы с управлением от человека не относятся к роботам, даже если управление ведется на расстоянии. С пятидесятых годов они применяются для безопасной работы с радиоактивными материалами и других неповторяющихся операций в недоступной для человека среде. Манипулятор состоит из исполнительной механической руки, помещенной в опасную зону и задающей механической руки, на которую воздействует оператор, находящийся в безопасной зоне. В первых конструкциях задающая и

исполнительная руки были связаны тросами и лентами так, чтобы движения задающей руки копировались движениями исполнительной руки. В дальнейшем механическая связь задающей и исполнительной рук была заменена электрической связью, позволившей уменьшить нагрузку на оператора, повысить грузоподъемность манипулятора, ввести управление вне прямой видимости.

К роботам не может быть отнесен автооператор, представляющий собой автоматически действующий манипулятор без перепрограммирования движений. Повторение циклов управления осуществляется аппаратным устройством управления. Переналадка автооператора на другую операцию трудно осуществима, так как требуется изменение длины звеньев манипулятора и замена устройства управления. Обычно автооператоры входят в состав конкретного оборудования.

Средой функционирования робота является технологическое оборудование, условия работы и порядок выполнения рабочих операций. В зависимости от состояния среды изменяется программа управления приводами робота и его воздействие на среду (рис. 1.2).

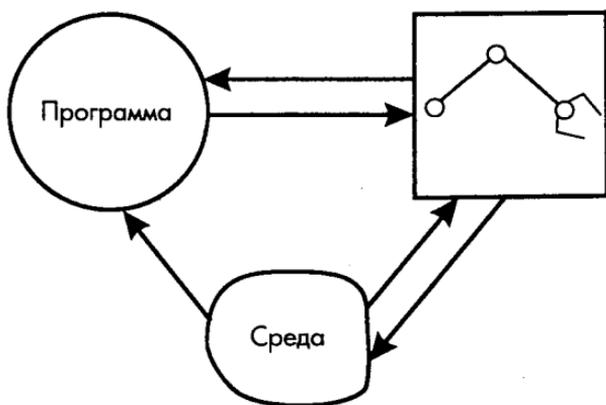


Рис. 1.2. Схема работы робота

С другой стороны, на механическую базу робота воздействует среда. Это может быть изменение сопротивления перемещению звеньев. Информация об изменении механической базы вводится в систему управления с целью корректировки программы управления.

Сложность кинематической цепи манипулятора характеризуют числом степеней подвижности, в которое обычно не включают степень подвижности захватного устройства.

Число степеней подвижности равно числу независимых перемещений звеньев кинематической цепи относительно неподвижного основания [4]. Звено манипулятора может осуществлять качание, поворот или возвратно-поступательное перемещение относительно смежного звена. Каждое перемещение характеризуется границами, временем перемещения, максимальными скоростью и ускорением перемещения, погрешностью позиционирования, числом программируемых точек на траектории перемещения звена, погрешностью отработки траектории.

Погрешность позиционирования — максимальное отклонение рабочего органа от заданной точки при повторении циклов перемещения (рис. 1.3). Для роботов с электроприводом погрешность позиционирования составляет 0,1–0,5 мм.

Погрешность отработки траектории — это максимальное отклонение фактической траектории перемещения рабочего органа между точками А и В от траектории, заданной программой управления (рис. 1.4).

Рабочая зона — это пространство, в котором может находиться рабочий орган манипулятора или робота. Она зависит от размеров звеньев, их перемещений и кинематической схемы манипулятора. Рабочая зона задается в описании манипулятора. Погрешность позиционирования или отработки траектории увеличивается при увеличении грузоподъемности и рабочей зоны робота. Так, робот грузоподъемностью 4,5 кг с

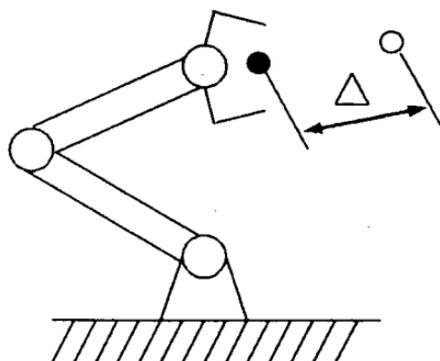


Рис. 1.3. Погрешность позиционирования

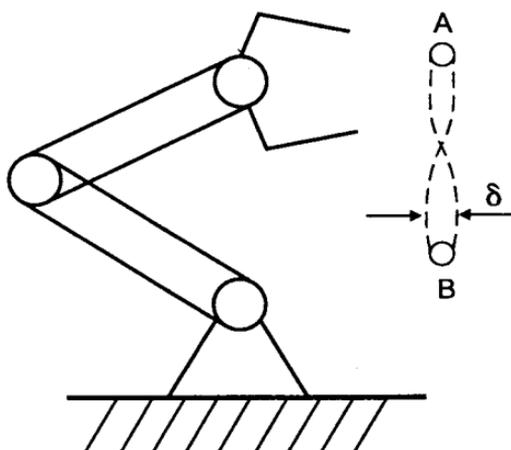


Рис. 1.4. Погрешность обработки траектории рабочим органом манипулятора

удалением рабочего органа до 0,5 м имеет погрешность позиционирования около 0,5 мм. Увеличение грузоподъемности или рабочей зоны манипулятора без повышения погрешности позиционирования рабочего органа является сложной задачей.

Зона обслуживания представляет собой часть рабочей зоны, в которой робот выполняет технологические операции. Она определяется условиями применения робота. На рис. 1.5 заштрихована зона обслуживания манипуляционного робота при сборке изделия.

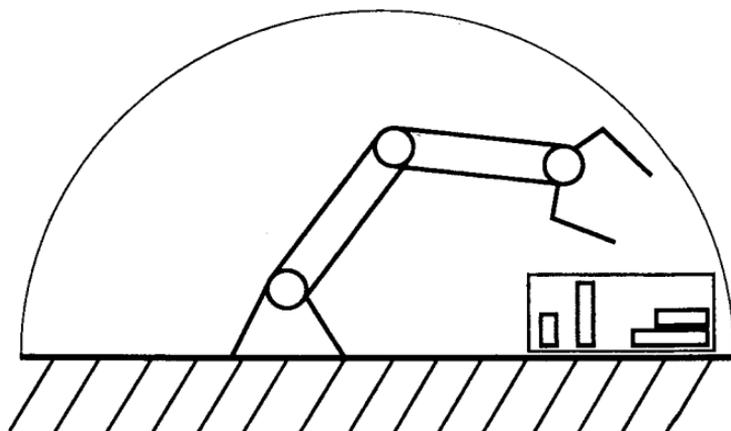


Рис. 1.5. Зона обслуживания в рабочей зоне робота

Захватное устройство характеризуется усилием захватывания, временем захватывания, временем отпуская, максимальным и минимальным размерами объекта манипулирования.

Различают три поколения роботов: программные, адаптивные и интеллектуальные (табл. 1.1). Применение робота того или иного поколения в технологическом процессе определяется не столько развитием робототехники, сколько влиянием среды функционирования на процесс.

Программные роботы не имеют датчиков, поэтому работают при фиксированном состоянии среды. Адаптивные роботы применяют в тех случаях, когда можно перечислить возможные состояния среды и для каждого состояния задать программу управления роботом.

В систему управления закладывают набор алгоритмов управления и, в зависимости от состояния среды, выбирают тот или иной алгоритм управления. Интеллектуальные роботы в процессе своего функционирования формируют модель среды, для которой вырабатывают план действий. Для этого применяются сложные алгоритмы классификации неизвестных ситуаций и выбора последовательности действий. Проблема технической имитации интеллектуальных свойств человека исключительно сложна. Поэтому применение интеллектуальных роботов может быть оправдано в тех случаях, когда невозможно предусмотреть изменения среды, например на других планетах. Даже в будущем роботы вряд ли смогут выполнять такие ориентированные на интеллектуальные свойства человека работы, как починка

Таблица 1.1

Что могут делать роботы

ПРОГРАММНЫЕ	АДАПТИВНЫЕ	ИНТЕЛЛЕКТНЫЕ
Загружать или разгружать технологическое оборудование; окрашивать изделия простой формы; резать плоские материалы; манипулировать рабочим инструментом; вести точечную сварку	Собирать детали в изделие; контролировать качество изготовления; вести дуговую сварку; вести зачистку и шлифование; наносить покрытия на изделия сложной формы; сортировать изделия; перемещаться по заданной траектории; резать материалы сложной формы; переносить хрупкие предметы; мыть окна; выполнять заказы в кафе	Перемещаться по неизвестной местности; отыскивать заданные предметы; находить наружные и внутренние дефекты; распознавать препятствия;

мебели и одежды, езда на велосипеде, сортировка рукописей, приготовление еды. Недоступны для роботов будут и творческие работы — сочинение музыки и литературных произведений, исполнение музыки, декламация.

По виду выполняемых операций промышленные роботы делят на *вспомогательные и технологические*. Вспомогательные роботы выполняют операции по установке заготовок на технологическую машину и их снятию после обработки. В качестве рабочего органа в них используется захватное устройство. По-существу, вспомогательные роботы имитируют действия рабочего по обслуживанию станка. При этом сохраняется традиционная, приспособленная к возможностям человека, технология производства. Технологические роботы ведут непосредственную обработку заготовок. В качестве рабочего органа в них используется рабочий инструмент: сварочные клещи, окрасочный пистолет, абразивная головка и т.п.

По мере развития технологических роботов открываются ранее недоступные для человека быстрые и точные операции резки материалов, сварки, окраски изделий, выбора оптимальных режимов обработки, хранения неограниченных объемов технологической информации, измерения характеристик изделий. Это позволило создавать принципиально новые производственные технологии, которые не могут применяться без робототехники.

В зависимости от выполняемых задач различают манипуляционные, мобильные, информационно-управляющие роботы [2].

Манипуляционный робот предназначен для выполнения механических операций, подобных выполняемым человеком, но с изменением масштаба, размеров и усилий. К ним относятся перенос объекта между заданными точками, перемещение объекта по заданной траектории, обработка объекта с помощью инструмента на

рабочем органе. Большинство роботов, применяемых в машиностроении, представляют собой автоматические манипуляторы первого поколения. Развитие дистанционного управления манипуляционными роботами позволило выполнять действия в космосе, вести межконтинентальные хирургические операции. В 2000 г. во Франции была впервые проведена операция с помощью манипулятора, управляемого через телекамеру хирургом из США.

Мобильный робот перемещается в пространстве между заданными точками. Исследовательские мобильные роботы могут доставлять пробы из недоступных для человека мест. Аварийно-спасательные мобильные роботы предназначены для вывоза людей через опасные зоны. Специализированные мобильные роботы разрабатываются для доставки взрывчатых и опасных материалов, военных операций и борьбы с терроризмом, обезвреживания невзорвавшихся боеприпасов, разминирования и других задач, выполнение которых опасно для человека. Технологические мобильные роботы применяют в гибких производственных системах для перевозки грузов между единицами технологического оборудования.

Информационно-управляющий робот имитирует и расширяет информационно-управляющие возможности человека. Он может не оснащаться манипулятором. Таким роботом является дистанционно управляемая самоходная тележка, оснащенная бортовыми телекамерами, пробоотборниками, измерительными приборами. Роботы ведут сбор информации от бортовых датчиков, ее обработку по заданным алгоритмам, накопление или передачу информации оператору, автоматическую выработку управляющих команд в зависимости от полученной информации. В отличие от человека информационно-управляющий робот может дополнительно извлекать информацию об объектах при отсутствии освещенности и за невидимым препятствием, распределении

теплового поля по поверхности объекта. Его применение позволяет увеличить скорость работы оборудования, ограниченную психофизиологическими возможностями оператора, накапливать информацию о прошлом управлении, прогнозировать развитие процесса, сопоставлять информацию от разных датчиков, определять свойства неизвестных объектов в любой среде. К информационно-управляющим роботам относятся контрольно-измерительные роботы для измерения параметров изделий в процессе изготовления.

Развернутая классификация промышленных роботов [4] дополнительно включает такие признаки, как:

- вид производства (литейное, кузнечно-прессовое, сборочное, металлорежущее, сварочное, термообработывающее);

- система координат манипулятора (цилиндрическая, сферическая, прямоугольная, угловая и др.);

- грузоподъемность (сверхлегкие — до 1 кг, легкие — до 10 кг, средние — до 200 кг, тяжелые — до 1000 кг);

- степень мобильности (стационарные или подвижные);

- конструктивное исполнение (встроенные в оборудование, напольные, подвесные);

- тип привода звеньев (пневматический, гидравлический, электромеханический);

- управление перемещением звена между заданными точками (цикловое, позиционное, контурное).

Технические возможности роботов оценивают номинальной грузоподъемностью, размерами и формой рабочей зоны, максимальным перемещением звеньев, временем перемещения звеньев, скоростью и ускорением перемещения звеньев, погрешностью позиционирования рабочего органа, усилием и временем захватывания объекта, временем отпускания объекта, максимальным и минимальным размерами объекта манипулирования, числом одновременно управляемых приводов перемещения, чис-

лом каналов связи с оборудованием, давлением жидкости или воздуха, потреблением энергии, наработкой на отказ, сроком эксплуатации, массой и габаритами.

Развитие промышленной робототехники идет в направлениях:

- переход от загрузочно-разгрузочных роботов по обслуживанию технологического оборудования к технологическим роботам, выполняющим основные операции, такие как механическая обработка материалов, сварка, нанесение покрытий;

- объединение отдельных роботизированных участков в гибкую производственную систему, способную выполнять разные заказы на одной технологической линии;

- повышение доли адаптивных роботов, способных приспосабливаться к изменениям технологической среды;

- создание промышленных роботов для немашиностроительных отраслей, таких как горное дело, сельское хозяйство, легкая промышленность, микроэлектроника, медицина, транспорт.

1.2. ИСТОРИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Первая промышленная революция происходила с 1760 по 1830 гг., когда появились паровые машины и механизированные прядильно-ткацкие станки. Вторая промышленная революция охватывает период с 1870 по 1910 гг. В это время были созданы двигатель внутреннего сгорания и конвейерное производство, широко внедрялось электричество. Третья промышленная революция началась в 1970 г. с производства и применения микропроцессоров. Ее проявлениями стали информационные технологии на основе вычислительной техники, промышленных роботов, высокоскоростных сетей передачи информации, перепрограммируемого управления оборудованием.

Впервые термин «робот» (от чешского слова «роботник») был применен чешским писателем Карелом Чапком в 1920 г. для механических рабочих в пьесе «Универсальные роботы Россума». В ней рассказывалось о производстве человекоподобных механизмов (андроидов), отличавшихся высокой работоспособностью. Постепенно роботы совершенствуются, восстают и побеждают людей.

Вообще корни робототехники уходят в глубокую древность. Более двух тысяч лет назад Герон Александрийский разработал водяной автомат «Поющая птица» и конструкции движущихся фигур в античных храмах. В 1500 г. Леонардо да Винчи создал механического льва, который при въезде короля в город открывал герб Франции. Прямыми предшественниками роботов были механические руки — протезы для инвалидов, появившиеся в XVI веке. Сохранилась механическая кукла «Писец», созданная в XVIII в. швейцарским часовщиком П. Жаке-Дрозом. С помощью сложных кулачковых барабанов и механизмов перемещения пера программировалось написание текстов, содержащих до 40 букв.

В 30-х гг. появились конструкции андроидов, способных выполнять простейшие движения и произносить фразы по команде человека. Первый такой робот был сконструирован американским инженером Д. Уэксли для Всемирной выставки в Нью-Йорке в 1927 г. Было еще неясно, как применять роботов в промышленности. Для работы с радиоактивными материалами в 50-х г. стали разрабатывать механические манипуляторы, которые копировали движения рук человека, находящегося в безопасном месте. Дистанционно управляемая тележка с манипулятором, телекамерой и микрофоном применялась в 1960 г. для осмотра местности и сбора проб в зонах высокой радиоактивности.

Появление станков с числовым программным управлением привело к созданию программируемых манипуляторов для разнообразных операций по загрузке и

разгрузке станков. В 1954 г. американский инженер Д. Девол запатентовал способ управления погрузочно-разгрузочным манипулятором с помощью сменных перфокарт. Вместе с Д. Энгельбергером в 1956 г. он организовал первую в мире компанию по выпуску промышленных роботов. Ее название «*Unimation*» (Юнимейшн) является сокращением термина «*Universal Automation*» (универсальная автоматика).

В 1962 г. в США были созданы первые промышленные роботы «Юнимейт» и «Версатран». Их сходство с человеком ограничивалось наличием манипулятора, отдаленно напоминающего человеческую руку. Некоторые из них работают до сих пор, превысив 100 тысяч часов рабочего ресурса.

«Юнимейт» имел 5 степеней подвижности с гидроприводом и двухпальцевое захватное устройство с пневмоприводом. Перемещение объектов массой до 12 кг осуществлялось с точностью 1,25 мм. В качестве системы управления использовался программноноситель в виде кулачкового барабана с шаговым двигателем, рассчитанный на 200 команд управления, и кодовые датчики положения. В режиме обучения оператор задавал последовательность точек, через которые должны пройти звенья манипулятора в течение рабочего цикла. Робот запоминал координаты точек и мог автоматически перемещаться от одной точки к другой в заданной последовательности, многократно повторяя рабочий цикл. На операции разгрузки машины для литья под давлением «Юнимейт» работал с производительностью 135 деталей в час при браке до 2%, тогда как производительность ручной разгрузки составляла 108 деталей в час при браке до 20%.

Робот «Версатран», имевший три степени подвижности и управление от магнитной ленты, мог у обжиговой печи загружать и разгружать до 1 200 раскаленных кирпичей в час. В то время соотношение затрат на электронику и механику в стоимости робота составля-

ло 75% и 25%, поэтому многие задачи управления решались за счет механики. Сейчас это соотношение изменилось на противоположное, причем стоимость электроники продолжает снижаться. Предлагаются необычные кинематические схемы манипуляторов. Быстро развиваются технологические роботы, выполняющие такие операции как высокоскоростное резание, окраска, сварка. Появление в 70-х гг. микропроцессорных систем управления и замена специализированных устройств управления на программируемые контроллеры позволили снизить стоимость роботов в три раза, сделав рентабельным их массовое внедрение в промышленности. Этому способствовали объективные предпосылки развития промышленного производства.

1. Рост затрат на рабочую силу.

С середины 70-х гг. прошлого века оплата одного часа работы рабочего в США превысила стоимость часа работы робота. Часовая оплата ручного труда в развитых странах растет на 10–15% в год при среднегодовом увеличении стоимости эксплуатации робота на 2–3%. Уже через 2,5–3 года эксплуатация робота вместо рабочего начинает приносить прибыль. По расчетам специалистов предприятий США, в среднем час эксплуатации робота приносит прибыль 13 долларов.

2. Насыщение рынка товаров и обострение конкурентной борьбы.

Продукция предприятий с традиционными технологиями производства быстро вытесняется конкурентами с современного рынка. Появляются предприятия, способные с помощью микроэлектронных систем управления оборудованием, робототехники и гибких производственных систем быстро менять номенклатуру изделий в соответствии с изменениями рыночного спроса. Сокращается время морального износа товаров. Проблема производства товаров вытесняется проблемой их сбыта.

Эти проявления видны на протяжении всего развития человеческого общества, которое можно разделить на три фазы: доиндустриальную, индустриальную и постиндустриальную. Для доиндустриального общества характерна занятость ручным трудом множества людей, для которых не удовлетворены их первичные потребности в питании, жилье и транспорте.

Постепенная механизация и автоматизация технологических процессов привела к появлению индустриального общества, при котором ручной труд заменяется машинным, а высвободившиеся люди занимаются созданием новых машин или переходят в сферу обслуживания. Экономия общих затрат труда позволяет реализовать принцип производства «сделано — продано», при котором удовлетворяются первичные потребности людей. Затем рост производительности труда уравнивается растущим спросом на его продукцию.

Информационная технологическая революция, основанная на микрокомпьютерных системах управления оборудованием, высокоскоростных информационных сетях и промышленной робототехнике, формирует постиндустриальное общество, в котором гибкое производство удовлетворяет все новые и новые потребности людей. Главным становится принцип производства «сделано то, что нужно, когда нужно и сколько нужно».

Способность предприятия к выживанию в острейшей конкурентной борьбе отождествляется с его способностью с минимальными затратами и в короткие сроки перестроиться на выпуск новой продукции в соответствии с колебаниями спроса. Это может быть реализовано только при применении многофункциональных роботов с перепрограммируемым управлением.

3. Дефицит рабочих на опасных, тяжелых и монотонных работах — под землей, в горячих цехах, в химически активных средах, при погрузке и разгрузке, на конвейере и обслуживании станков.

В развитых странах работа с повышенными физическими и психологическими нагрузками, разрушающими здоровье, не привлекает человека. По требованиям страховых компаний увеличиваются расходы на обязательное страхование рабочих с вредными условиями труда. Страховые выплаты в случае гибели человека на производстве достигают 10 млн долларов. Предприниматели вынуждены компенсировать плохие условия труда повышенной оплатой или же вводить средства робототехники вместо рабочих.



Рис. 1.6. Потери времени при работе металлорежущего станка

4. Неполная загрузка оборудования.

Результаты многих исследований показали, что доля полезного времени работы металлорежущего станка в мелкосерийном производстве не превышает 6% [5]. Остальное время теряется из-за праздников, наладки, неполной загрузки во второй и третьей сменах (рис. 1.6).

Повышение производительности станка не приводит к увеличению выпуска изделий из-за медленного

выполнения человеком вспомогательных операций, таких как установка заготовки и снятие полуфабриката. В отличие от человека робот способен работать без перерывов и обслуживать высокоскоростные операции штамповки, окраски, сварки и сборки. При этом загрузка технологического оборудования увеличивается в несколько раз. Следует отметить, что экономический эффект от повышения загрузки оборудования увеличивается по мере повышения его стоимости.

5. Необходимость повышения качества продукции, экономии материалов и энергии.

Повышение качества не только обеспечивает конкурентоспособность продукции, но и снижает ее себестоимость за счет уменьшения доли брака, сокращения затрат на сборку, проверку, доработку и гарантийное обслуживание. В отличие от рабочего, робот может точно повторять технологические операции с одинаковыми заготовками.

Особенно это заметно при дуговой сварке, когда человек не способен уменьшить отклонения реальных показателей сварочного шва от требуемых менее чем на 10%. При окраске ручным распылителем на окрашиваемую поверхность попадает около 30% материала, а остальное уходит в вытяжную систему. Кроме того, ручная окраска не обеспечивает оптимальный режим нанесения покрытия.

В отличие от человека, робот не требует освещения, обогрева, кондиционирования воздуха, помещений для персонала.

С появления первого промышленного робота прошло три бума роботизации. Первый начался в 1968 г. с применением микропроцессоров для управления роботами и быстро закончился из-за ненадежности и несовершенства роботов первого поколения, ограниченности технологических приложений робототехники. Второй бум связан с появлением адаптивных роботов в 1972 г., когда

возможности робототехники стали расширяться. Появление в 1980 г. роботов с элементами искусственного интеллекта стало началом третьего бума промышленной робототехники. При этом отношение к возможностям робототехники стало более трезвым.

Первоначальной целью роботизации было высвобождение человека от вредных, тяжелых и монотонных работ без перестройки технологического процесса. Затем роботы стали применять для повышения качества технологических операций дуговой и точечной сварки, абразивной зачистки, резки, нанесения покрытий. По мере совершенствования робототехники роботизированные технологические комплексы стали объединять в гибкие производственные системы, обеспечивающие полную автоматизацию технологического цикла. В них роботы выполняют функции, которые были недостижимы для выполнения рабочим: высокоскоростную резку, точную сварку, высококачественное нанесение покрытий, стабильную сборку. Роботы стали основой производства, способного быстро перестраиваться на выполнение поступающих заказов.

1.3. КИНЕМАТИКА МАНИПУЛЯТОРОВ

Манипулятор представляет собой разомкнутую последовательность подвижно соединенных звеньев, начало которой соединено с неподвижным основанием, а конец оснащен рабочим органом. Для переноса рабочим органом круглого предмета в заданную точку пространства необходимы поступательные перемещения по трем осям — вперед или назад, вправо или влево, вверх или вниз (рис. 1.7).

Если предмет несимметричен, то для его ориентации в заданной точке пространства требуется также поворот вокруг каждой оси. Первые три степени по-

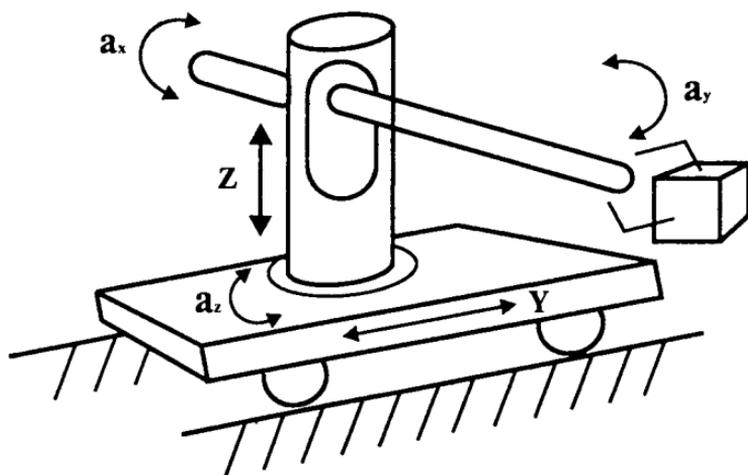


Рис. 1.7. Транспортные (X, Y, Z) и ориентирующие (a_x, a_y, a_z) степени подвижности манипулятора

движности называют транспортными, вторые три — ориентирующими. Для перемещения манипулятора вместе с основанием робота дополнительно требуются координатные степени подвижности. Обычно промышленные роботы имеют 5–6 степеней подвижности. Часто для них достаточно 3–4 степеней подвижности, не считая подвижности захватного устройства.

Звенья манипулятора, как правило, имеют поступательное или вращательное соединение друг с другом в одной плоскости (рис. 1.8).

Два соседних звена образуют кинематическую пару. В зависимости от комбинации соединений звеньев возможно множество кинематических схем манипуляторов. Однако движения манипуляторов с разными кинематическими схемами могут осуществляться в одной из четырех основных систем координат. В [5] особенно наглядно показаны компоновки и рабочие зоны манипуляторов для каждой системы координат.

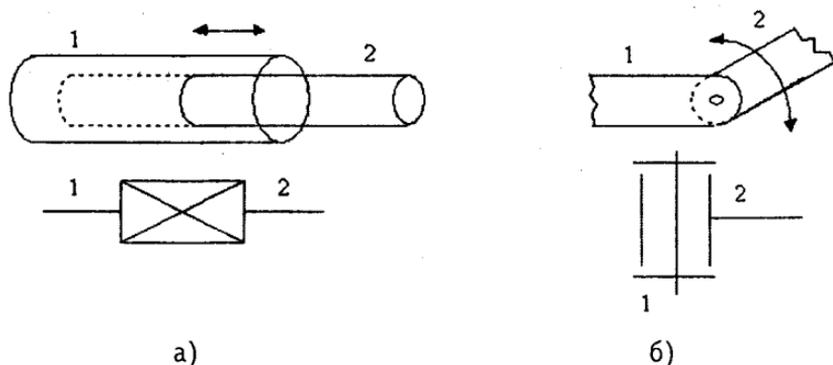


Рис. 1.8. Соединения звеньев манипулятора:
 а — поступательное; б — вращательное

Цилиндрическая система координат реализуется двумя поступательными и одной вращательной кинематическими парами (рис. 1.9).

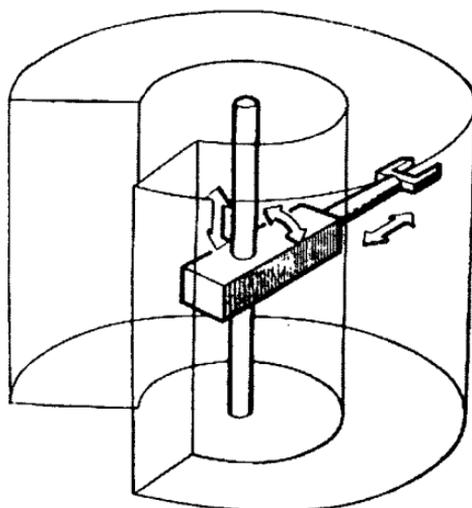


Рис. 1.9. Манипулятор в цилиндрической системе координат

Горизонтальная рука может вдвигаться или выдвигаться параллельно основанию, двигаться вверх или вниз по вертикальной стойке. Основание поворачивается вместе с рукой и стойкой вокруг вертикальной оси, образуя рабочую зону, имеющую форму части цилиндра.

Сферическая (полярная) система координат реализуется двумя вращательными и одной поступательной кинематическими парами (рис. 1.10).

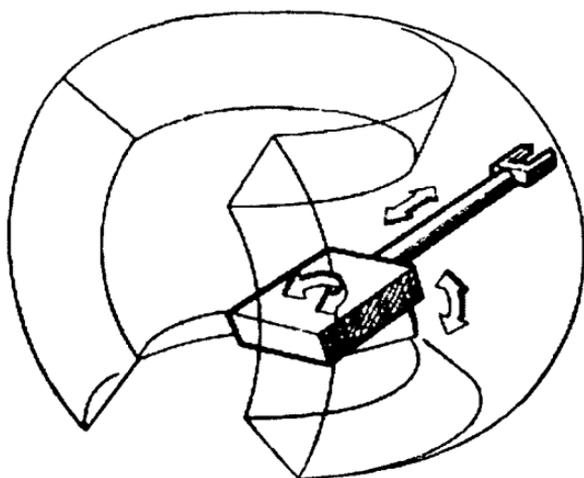


Рис. 1.10. Манипулятор в сферической системе координат

Рука, как и раньше, может вдвигаться, выдвигаться и вращаться на основании, но использует вращательное вертикальное движение вместо поступательного, образуя часть сферы.

Прямоугольная (декартова) система координат реализуется тремя поступательными кинематическими парами (рис. 1.11).

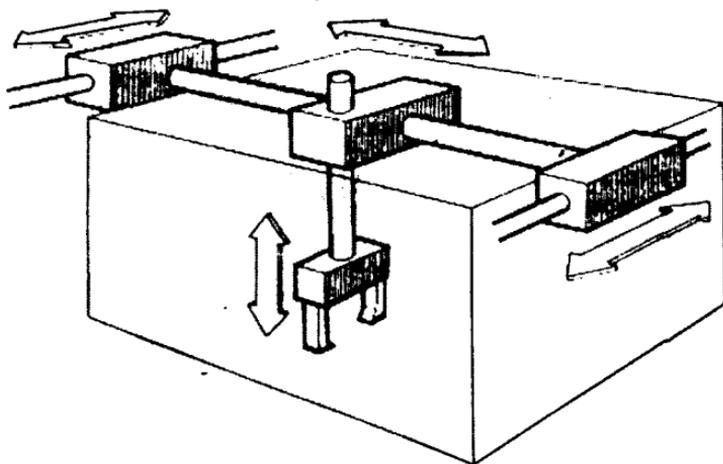


Рис. 1.11. Манипулятор в декартовой системе координат

Манипулятор обладает тремя взаимно перпендикулярными осями поступательных перемещений и состоит из стойки, которая движется вверх или вниз, поперечной балки, к которой подвешена стойка с возможностью движения вправо или влево, и направляющих, по которым вперед или назад движется балка. Рабочая зона имеет форму параллелограмма. Свойства этой конфигурации позволяют применять манипулятор там, где требуется высокая точность позиционирования, например, при резке плоских материалов или нанесении покрытий.

Угловая (ангулярная) система координат реализуется тремя вращательными кинематическими парами при шарнирном соединении звеньев манипулятора (рис. 1.12).

Движения манипулятора напоминают движения руки человека, поэтому он называется антропоморфным манипулятором. Манипулятор состоит из «плеча» и «локтя», закрепленных на «тали» в виде вращающегося

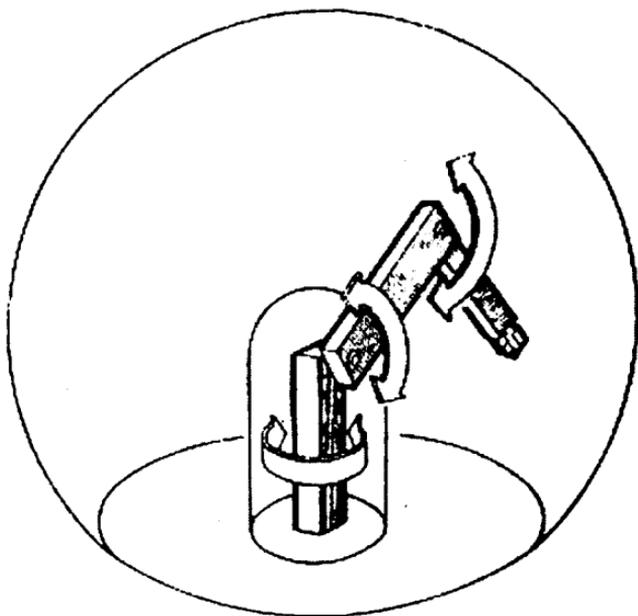


Рис. 1.12. Манипулятор в угловой системе координат

основания, обеспечивающего третью степень подвижности. Преимущество таких схем — большая рабочая зона. В угловой системе координат работают известные роботы типа PUMA (программируемый универсальный манипулятор для сборки).

Рассмотренные системы координат были известны и до появления роботов. По ним конструировали обычные манипуляторы. Развитие робототехники привело к появлению принципиально новых кинематических схем манипуляторов, вытесняющих традиционные компоновки.

Селективная податливая рука сборочного робота (SCARA — *Selective Compliance Assembly Robot Arm*) изобретена Х. Макино (университет Яманаси, Япония). Звенья манипулятора взаимно поворачиваются в од-

ной плоскости, а рабочий орган совершает поступательные движения вверх или вниз (рис. 1.13).

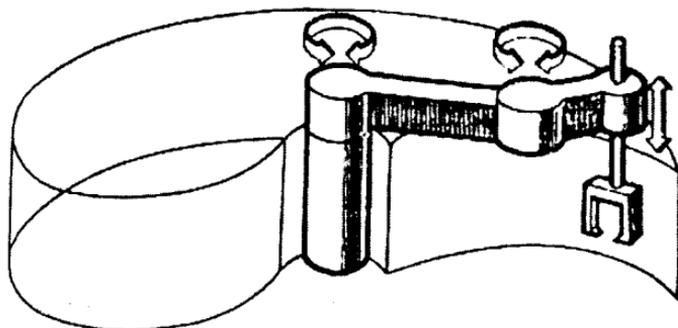


Рис. 1.13. Кинематическая схема SCARA

Кинематика SCARA подобна схемам в угловой системе координат, однако вращающиеся соединения звеньев расположены в горизонтальной, а не в вертикальной плоскости с использованием вертикальной оси для подъема захватного устройства. В такой конструкции сочетаются свойства схем в угловой и цилиндрической системах координат. За счет жесткости конструкции в вертикальном направлении манипуляторы SCARA могут нести повышенные нагрузки на рабочем органе. Высокая точность позиционирования рабочего органа и большая рабочая зона позволяют особенно эффективно применять компоновку SCARA при сборке.

Манипулятор SPINE состоит из множества чечевицеобразных стальных дисков, стянутых друг с другом двумя парами тросов (рис. 1.14). Каждый трос соединен с приводом поступательного перемещения, находящегося в основании манипулятора. Датчики положения рабочего органа передают информацию в сис-

тему управления, которая меняет натяжение каждого троса. Обладая большим радиусом действия и высокой маневренностью, робот способен добираться до таких точек объекта, которые недоступны другим кинематическим схемам. С его помощью, например, может выполняться окраска внутренних полостей автомобиля [6].

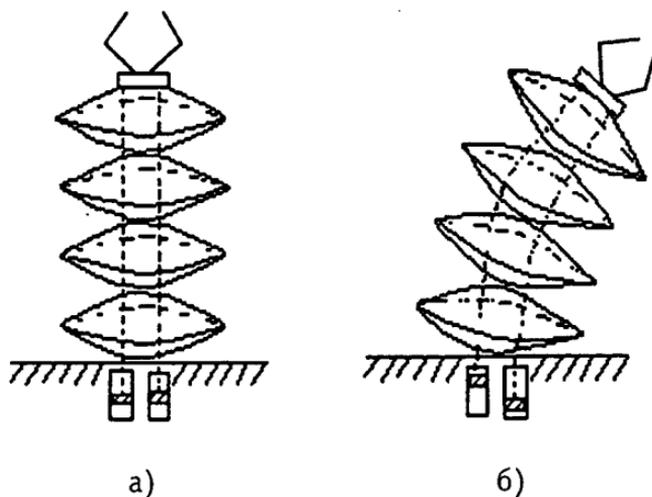


Рис. 1.14. Компоновка манипулятора SPINE:

- а — тросы натянуты одинаково;
- б — тросы натянуты по-разному

Манипулятор ASEA напоминает маятник с карданным подвесом относительно продольной и поперечной осей (рис. 1.15). Его рабочая зона имеет форму корыта. При скорости движений в 1,5 раза больше, чем у традиционных манипуляторов, погрешность позиционирования составляет около 0,1 мм.

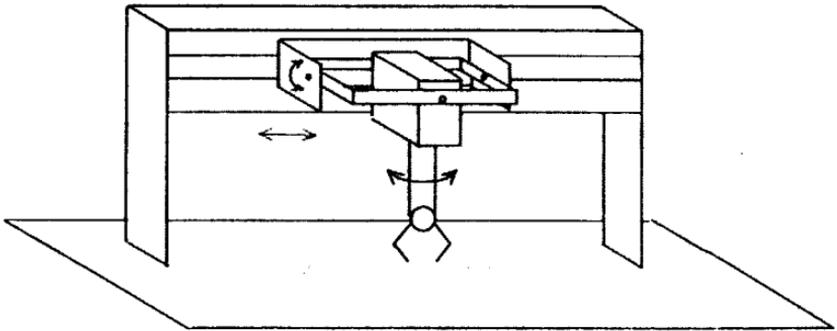


Рис. 1.15. Компонровка манипулятора ASEA

Фирмой ABB Automation (Швеция-Швейцария) разработана компоновка манипулятора *Flex Picker*, отличающаяся удачным воплощением идей мехатроники и высокими скоростями перемещений рабочего органа (рис. 1.16). На осях четырех серводвигателей с общим управлением имеются диски, к каждому из которых прикреплена кинематическая пара с вращательным соединением звеньев. Свободные концы звеньев каждой пары соединены в одной точке, к которой прикреплено захватное устройство.

Чем больше степеней подвижности имеет манипулятор, тем сложнее рассчитывать величины взаимных перемещений звеньев для перемещения рабочего органа манипулятора в заданную точку пространства. Для каждой системы координат можно составить уравнения, связывающие координаты рабочего органа в пространстве с перемещениями звеньев манипулятора. Конструкцию манипулятора представляют в виде кинематической модели с обозначениями координат и перемещений звеньев в пространстве (рис. 1.17).

Составим уравнения, связывающие размеры и перемещения звеньев с координатами рабочего органа в пространстве для трех систем координат. Проекция

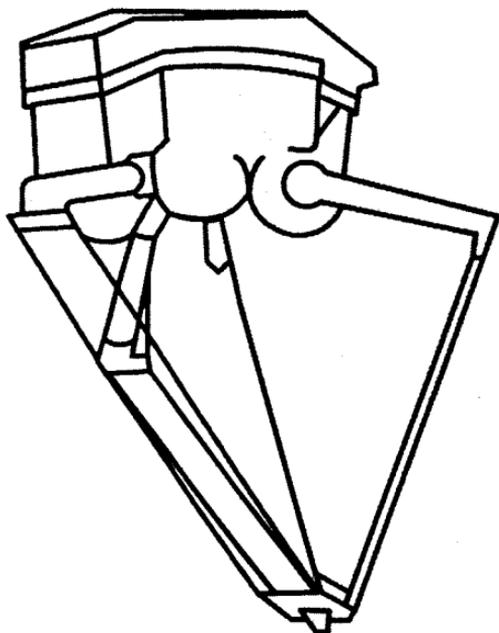


Рис. 1.16. Компонка манипулятора Flex Picker

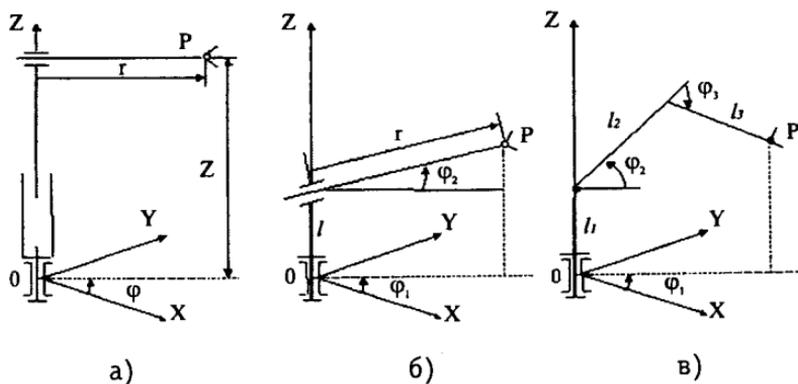


Рис. 1.17. Кинематические модели манипуляторов:
 а — цилиндрическая система координат;
 б — сферическая система; в — угловая система

положения рабочего органа Р на оси координат обозначим как X_p, Y_p, Z_p .

Цилиндрическая система (рис. 1.17, а):

$$X_p = r \cdot \cos \varphi; Y_p = r \cdot \sin \varphi; Z_p = Z.$$

Сферическая система (рис. 1.17, б):

$$X_p = r \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2; Y_p = r \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2; Z_p = l + Z \cdot \sin \varphi_2.$$

Угловая система (рис. 1.17, в):

$$X_p = l_2 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos (\varphi_3 - \varphi_2);$$

$$Y_p = l_2 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos (\varphi_3 - \varphi_2);$$

$$Z_p = l_1 + l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin (\varphi_3 - \varphi_2).$$

Различают прямую и обратную задачи кинематики манипуляторов. При решении прямой задачи задают относительные перемещения звеньев манипулятора, для которых рассчитывают положение его рабочего органа в пространстве. Расчеты ведут с целью определения рабочей зоны робота для заданных размеров и перемещений звеньев, а также оценки погрешности позиционирования рабочего органа и отработки траектории при заданных погрешностях перемещений звеньев манипулятора определенного размера. В обратной задаче, наоборот, задают координаты рабочего органа в пространстве, для которых рассчитывают относительные перемещения звеньев манипулятора. Если прямую задачу решают при изготовлении манипулятора, то обратную задачу решают на месте эксплуатации манипулятора, когда задано положение технологического оборудования и требуется вывести рабочий орган манипулятора в заданную точку.

Сложность решения прямой и обратной задач заключается в том, что параметры движения каждого звена зависят не только от его привода, но и от движений пре-

дыдущих звеньев. Кроме того, каждое соединение звеньев имеет свою систему координат, которую надо привести к системе координат рабочего органа. Особенно сложно рассчитывать скорости и ускорения движения звеньев и рабочего органа с учетом переменных нагрузок, сил инерции и трения. Если прямая задача кинематики имеет однозначное решение, то вывод рабочего органа манипулятора в заданную точку пространства в обратной задаче кинематики возможен при разных перемещениях звеньев (рис. 1.18).

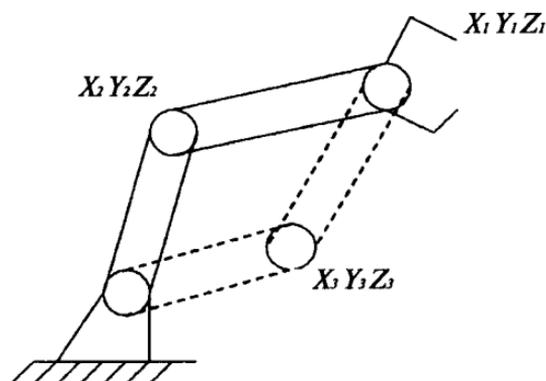


Рис. 1.18. Неоднозначное решение обратной задачи кинематики манипулятора

Решение прямой и обратной задач кинематики с целью выработки команд управления звеньями манипулятора в режиме реального времени слишком сложно.

1.4. ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Предназначены для захвата вспомогательным роботом объекта манипулирования и его удержания в определенном положении при переносе к месту обработки. Обязательными требованиями к захватным устройствам промышленных роботов являются: надежность захвата и удержания объекта, стабильность положения объекта манипулирования в захватном устройстве при переносе, недопустимость повреждений объекта при захвате, повышенная прочность при малых габаритах и массе, надежность крепления к руке робота в процессе выполнения тысяч операций переноса. В мелкосерийном производстве к захватным устройствам роботов предъявляют дополнительные требования: возможность захвата и переноса объектов с разными характеристиками; предотвращение захвата более одного объекта; возможность автоматической смены захватного устройства при смене заказа. Обычно робота комплектуют набором сменных захватных устройств (ЗУ), каждое из которых предназначено для захвата объектов манипулирования с близкими размерами, формами, массой и физическими свойствами.

Разрабатывают ЗУ, способные захватывать произвольно ориентированные объекты и автоматически изменять усилие удержания объекта манипулирования при изменении его массы.

Очувствленные ЗУ имеют датчики, показывающие форму объекта в захватном устройстве и соединенные с системой управления роботом.

Элементы захватного устройства, механически контактирующие с объектом, называют *губками*. Сила удержания объекта манипулирования должна быть в 10–30 раз больше его веса. Она зависит от кинематики ЗУ, конструкции губок, формы объекта, способа фиксации объекта. Минимальные значения приложенных сил и моментов, обеспечивающие фиксацию ци-

линейчатой детали губками хватного устройства (рис. 1.19) определяются по формулам [7]:

$$|F_x| = \frac{1}{2} \cdot f \cdot S \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right);$$

$$|F_y| = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad |F_z| = S;$$

$$|M| = \frac{1}{2} \cdot f \cdot S \cdot r \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right);$$

$$|M_z| = \frac{1}{2} \cdot S \cdot d \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad |M_y| = S \cdot d;$$

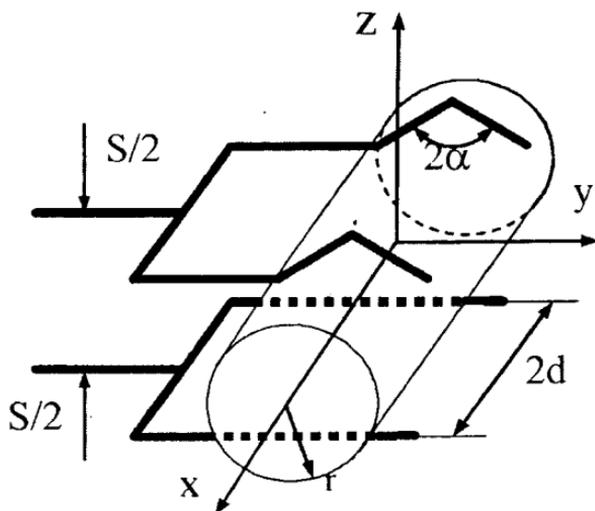


Рис. 1.19. Схема захвата объекта

В распространенных шарнирно-рычажных ЗУ усилие удержания (S) и величина (h) раскрытия губок зависят от сформированного приводом усилия (F), длины (l) и угла (α) поворота рычага губки (рис. 1.20):

$$S = \frac{F}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha, h = l \cdot \sin \alpha$$

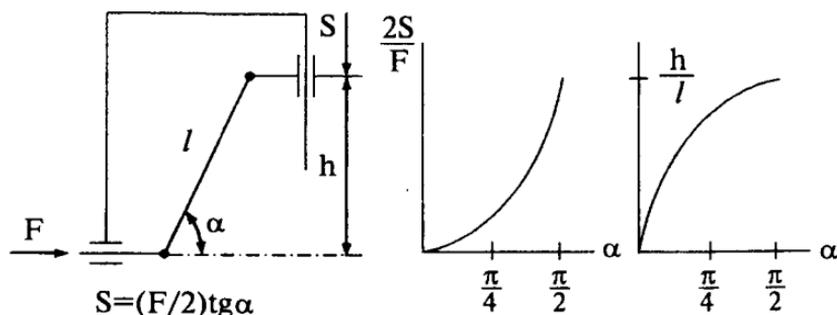


Рис. 1.20. Зависимость усилия удержания S и величины хода h захватного устройства от угла поворота рычага α

Для практических приложений разработаны сотни конструкций ЗУ, которые по принципу действия можно разделить на три группы.

1. Зажимные захватные устройства

Объект манипулирования удерживается за счет сил трения. Захват и отпускание объекта осуществляют с помощью привода. Различают два типа зажимных ЗУ: механические и оснащенные эластичными камерами. Механические ЗУ имитируют захват объекта рукой человека (рис. 1.21).

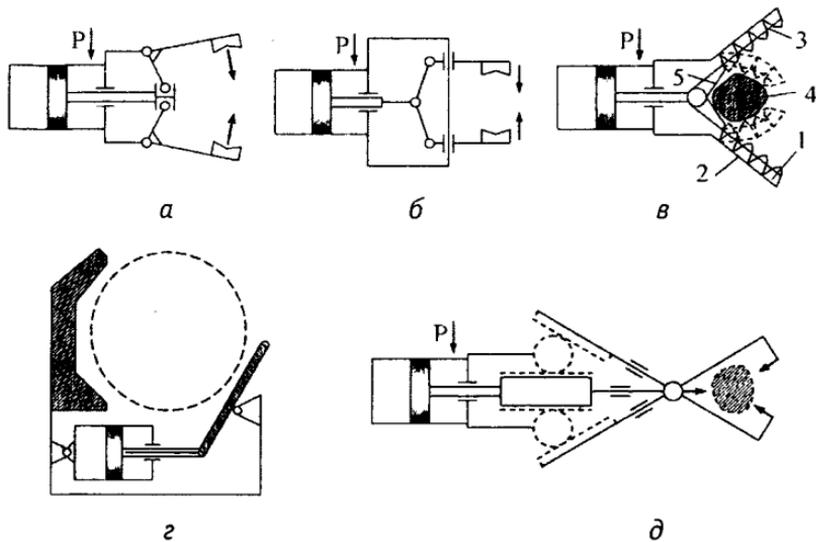


Рис. 1.21. Механические захватные устройства

Механическое захватное устройство, показанное на рис. 1.21, а, позволяет захватывать и центрировать цилиндрические детали. Схема на рис. 1.21, б отличается параллельным перемещением губок друг относительно друга. Захватное устройство на рис. 1.21, в содержит трапециевидальные сектора, закрепленные на пружинных пластинах. Сквозь сектора пропущен трос, связанный с приводом линейных перемещений. Перемещение штока вправо приводит к натяжению троса и зажиманию объекта произвольной формы. Тяжелые объекты манипулирования цилиндрической формы могут удерживаться захватным устройством на рис. 1.21, г. Объект захватывается при перемещении штока вправо. Его центрирование осуществляется в процессе захвата за счет специальной выемки в неподвижной части. В схеме рис. 1.21, д перемещение штока вправо приводит к повороту зубчатых колес против часовой стрелки и захвату объекта.

В захватных устройствах с эластичными камерами захват и отпускание объектов осуществляют путем деформации эластичных элементов. Как и в механических захватных устройствах, объект манипулирования удерживается за счет сил трения.

Первым захватным устройством с эластичными камерами стал так называемый схват Байера, созданный для захвата легкоповреждаемых объектов. Схват Байера представляет собой 4–6 пальцев в виде трубок из эластичного материала.

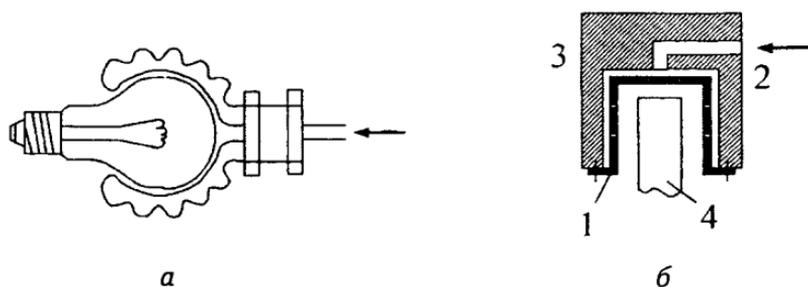


Рис. 1.22. Захватные устройства с эластичными камерами
а — схват Байера, *б* — с креплением эластичной
 камеры к корпусу

Внешняя часть трубки гофрирована, а внутренняя — гладкая (рис. 1.22, *а*). За счет такой формы пальцы захватного устройства раскрыты наружу. При подаче воздуха внутрь пальцев гофрированная часть трубки удлиняется, а длина гладкой части не меняется. Пальцы скручиваются внутрь и захватывают объект манипулирования.

Эластичные камеры могут захватывать объект (4) за внешнюю или внутреннюю поверхности при подаче воздуха между эластичной камерой (1) и корпусом захватного устройства (3) через отверстие (2) (рис. 1.22, *б*). Раздуваясь, эластичная камера зажимает объект (4)

за внешнюю поверхность. Для захвата за внутреннюю поверхность захватное устройство должно быть выполнено в виде пальца, на который надета эластичная камера. Даже при небольшом избыточном давлении такие устройства способны надежно фиксировать объект манипулирования.

2. Притяжные захватные устройства

Захват объекта осуществляется за счет сил притяжения, создаваемых с помощью вакуума, электромагнитного поля, адгезии, электростатического поля и т.п. Вакуумное захватное устройство, часто применяемое для переноса кинескопов, имеет резиновый раструб, укрепленный на шаровом соединении с пневмоштуцером (рис. 1.23).

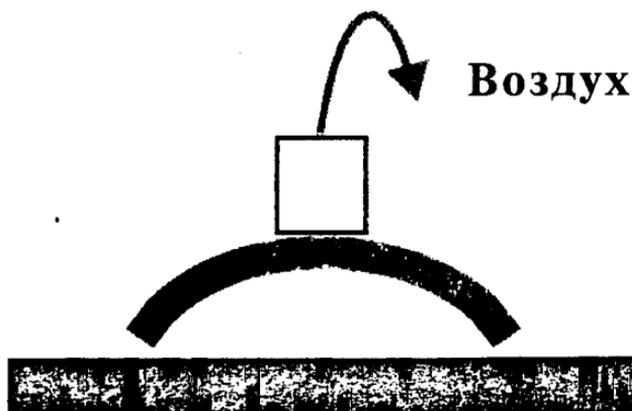


Рис. 1.23. Вакуумное захватное устройство

При откачивании воздуха из-под раструба плоский объект удерживается за счет разности давлений в атмосфере P_a и под раструбом P_b . Усилие притяжения зависит от площади раструба S и разности давлений с учетом коэффициента k , учитывающего изменение атмосферного давления и свойств уплотнителя (0,85):

$$F = k \cdot S \cdot (P_a - P_e)$$

Обычно $P_a - P_e = 0,03 \text{ МПа}$.

Электромагнитные захватные устройства применяют для взятия и переноса объектов из ферромагнитных материалов. Они представляют собой катушку на разомкнутом сердечнике, через которую пропускают электрический ток (рис. 1.24).

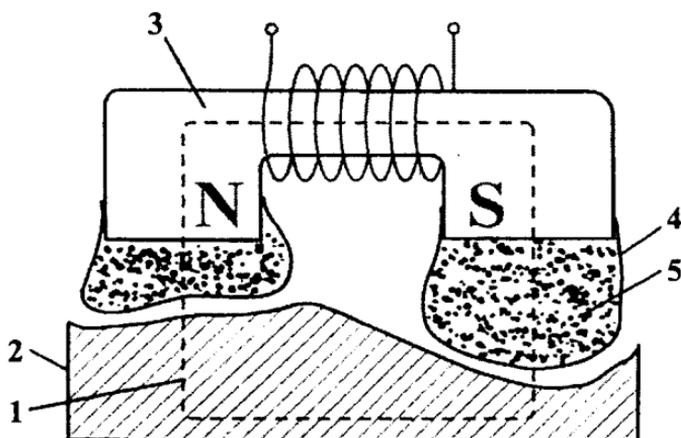


Рис. 1.24. Притяжное захватное устройство, использующее эффект электромагнитного притяжения ферромагнитных материалов: 1 — линия магнитного потока; 2 — объект; 3 — сердечник электромагнита; 4 — гибкие оболочки; 5 — ферромагнитные опилки

При этом образуется электромагнитное поле, притягивающее объект. Сила притяжения определяется по формуле Максвелла:

$$P = \frac{(I_n)^2}{25 \cdot F \cdot (R_B + R_M)^2},$$

где In — число ампер-витков обмотки; F — площадь контакта объекта с полюсами; R_b, R_m — магнитное сопротивление на воздушном и металлическом участках пути магнитного потока.

Для удержания объекта должно выполняться условие:

$$\frac{P}{m \cdot k_1 \cdot k_2} \geq g + a,$$

где m — масса объекта; $k_1 = 0,8$ коэффициент запаса; k_2 — коэффициент учета разности точек приложения подъемной силы и центра тяжести объекта; a — ускорение захвата; g — ускорение свободного падения.

Сопротивление протеканию магнитного потока через воздух в десятки раз больше, чем через металл. Как обеспечить надежное удержание объекта произвольной формы, если полюса сердечника имеют фиксированную форму, из-за чего площадь контакта сердечника с объектом может быть недостаточной для притяжения? Для этого на полюса сердечника надевают эластичные камеры, заполненные металлическими опилками. Сначала захватное устройство прижимают к объекту и камеры деформируются, принимая его форму в месте захвата. Затем к катушке прикладывают напряжение. Под действием электромагнитного поля опилки в камерах затвердевают, обеспечивая малое сопротивление протеканию магнитного потока.

В притяжных захватных устройствах электромагнитного типа можно регулировать усилие притяжения, изменяя величину тока через обмотку. Таким образом можно захватывать объект с ограничением его веса, например, при захвате одного металлического листа из стопки.

3. Поддерживающие захватные устройства

К ним относятся разнообразные крюки, петли или вилы, которые поддерживают объект за нижнюю поверх-

ность, выступающие части или отверстия. На рис. 1.25 показано поддерживающее ЗУ вилочного типа для извлечения ящика с заготовками из ячейки автоматизированного склада.

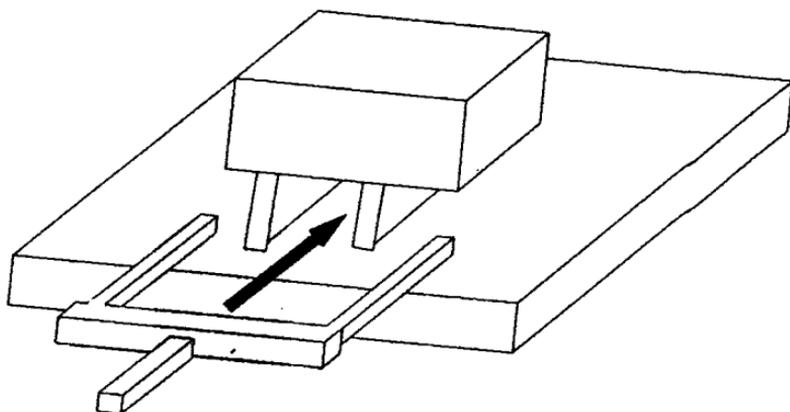


Рис. 1.25. Поддерживающее захватное устройство вилочного типа

По характеру ориентации объекта при захвате различают пять видов захватных устройств:

- ЗУ, способные изменять положение объекта путем управляемого перемещения своих элементов;
- центрирующие ЗУ, выравнивающие положение объекта за счет специальной формы элементов, например центрирования цилиндрических объектов;
- базирующие ЗУ, фиксирующие положение объекта по его базовой поверхности;
- фиксирующие ЗУ, сохраняющие в процессе переноса то положение объекта, которое было в момент захвата;
- ЗУ, не изменяющие положение объекта в процессе захвата.

По характеру управления захватные устройства делят на четыре группы:

- неуправляемые ЗУ на основе постоянных магнитов, вакуумных присосок или пружинных губок, с которых требуется снимать объект;
- командные ЗУ, управляемые командами захвата или отпускания объекта;
- программируемые ЗУ, в которых расстояние между губками и усилие захвата изменяются по командам системы числового программного управления;
- адаптивные ЗУ, оснащенные датчиками касания, формы объекта, массы объекта, усилия зажима, проскальзывания после захвата.

Пример адаптивного захватного устройства для захвата произвольно расположенных объектов показан на рис. 1.26.

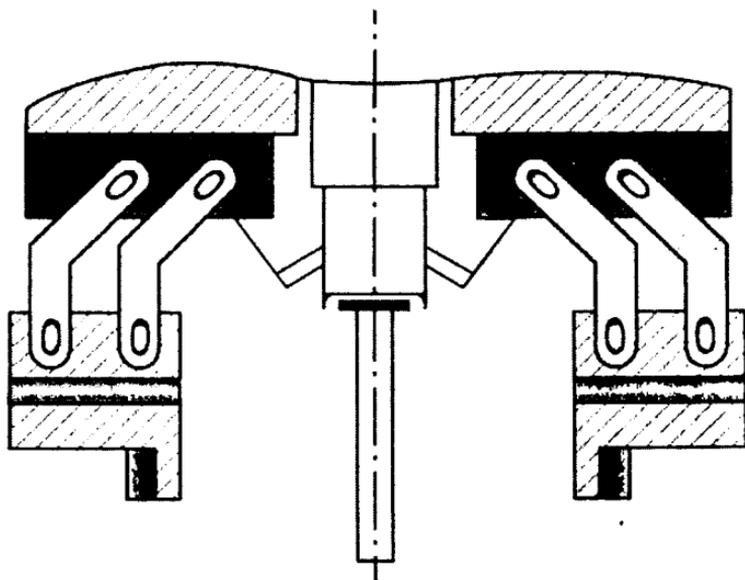


Рис. 1.26. Пример адаптивного захватного устройства

Между губками ЗУ помещен выдвижной щуп с датчиком усилий. В губках размещены датчики ближней локации. Сначала при раскрытых губках и выдвинутом щупе осуществляют последовательный просмотр места расположения объектов. После касания детали щупом датчик усилий измеряет компоненты вектора усилия, что позволяет найти центр объекта. Захватное устройство выводят на центр объекта, а фотодальномеры отыскивают участки объекта для захвата. После такой ориентации дается команда на захват объекта. Подобные ЗУ применяют для извлечения плоских объектов из навала.

Стремятся создавать захватные устройства, способные захватывать объекты любой формы. Захватное устройство «Омнигриппер» [5] представляет собой набор близко расположенных стержней, подвешенных на площадке с отверстиями (рис. 1.27).

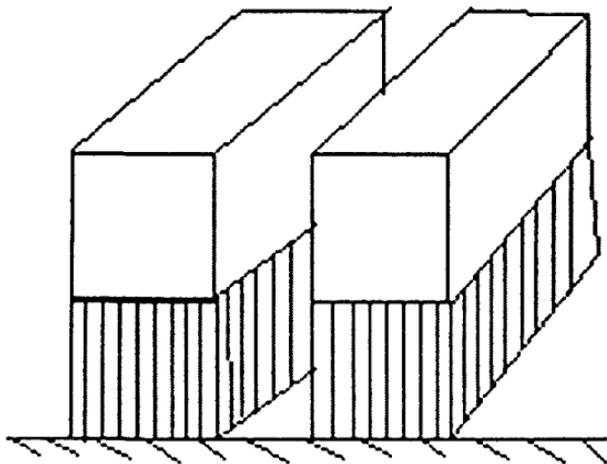


Рис. 1.27. Универсальное захватное устройство «Омнигриппер»

При его опускании на объект произвольной формы часть стержней выталкивается вверх, а остальные удерживают объект за счет сил трения между поверхностью объекта и охватывающими объект стержнями. Для отпускания объекта на вытолкнутые стержни опускают ровную пластину. Измеряя перемещение вытолкнутых стержней, можно распознавать объемную форму объекта в задачах автоматической сортировки.

Разработчики промышленных роботов не в состоянии предусмотреть все виды объектов манипулирования, с которыми будет работать робот. Как правило, захватные устройства приходится менять в процессе производства. По характеру крепления к манипулятору ЗУ делят на следующие группы:

- несменяемые ЗУ, являющиеся частью изготовленного манипулятора;
- сменяемые ЗУ, крепящиеся к манипулятору винтами;
- быстросменные ЗУ, заменяемые оператором при смене объектов манипулирования;
- автоматически сменяемые ЗУ, заменяемые по команде управления роботизированным комплексом.

1.5. ПРИВОДЫ

Для взаимных перемещений звеньев манипулятора используют гидравлический, пневматический или электрический приводы, которые размещают в соединениях звеньев. К таким приводам предъявляют специальные требования:

- минимальные габариты и масса при высокой выходной мощности, поскольку приводы должны быть помещены в соединениях разомкнутой последовательности звеньев манипулятора;
- стабильность характеристик в широком диапазоне нагрузок на захватном устройстве, поскольку

в одном направлении захватное устройство перемещается с грузом, а в другом — без груза;

— возможность быстрого разгона и торможения звеньев с целью точного позиционирования рабочего органа в заданной точке пространства;

— фиксация положения звена при отключении привода;

— независимость характеристик от изменений температуры;

— возможность одновременной работы всех приводов звеньев.

По степени управляемости различают приводы:

— нерегулируемые, обеспечивающие движение звеньев с одной рабочей скоростью;

— регулируемые, обеспечивающие заданную скорость движения звеньев при изменяющихся параметрах привода;

— следящие, обеспечивающие перемещение звена с заданной точностью при произвольном задающем сигнале;

— адаптивные, автоматически выбирающие оптимальные параметры управления при изменении условий работы.

Роботов первого поколения обычно оснащают пневматическим приводом. При большой массе объектов манипулирования применяют гидропривод. В современных роботах пневмопривод и гидропривод вытесняются электроприводом.

Гидропривод применяют для роботов большой (50–100 кг) и сверхбольшой (более 100 кг) грузоподъемности. Он обладает высоким быстродействием при малой инерционности, повышенной стабильностью скорости при изменении нагрузок благодаря несжимаемости рабочей жидкости, бесступенчатым регулированием скорости, высоким коэффициентом усиления мощности, прямым воздействием на звено манипулятора. К недостаткам гидропривода относятся появление утечек, не-

обходимость в насосной станции и зависимость скорости от температуры жидкости. Гидродвигатель с неограниченным угловым перемещением вала называют *гидромотором*, с ограниченным линейным перемещением — *гидроцилиндром*. В отличие от других механизмов, перемещение звена робота должно происходить с малой скоростью при ограничении начала и конца перемещения. Для этого применяют неполноповоротный гидродвигатель (рис. 1.28). Он состоит из вала с лопастью (1), который при подаче жидкости через золотник (2) поворачивается в корпусе (3). Вал соединен со звеном манипулятора.

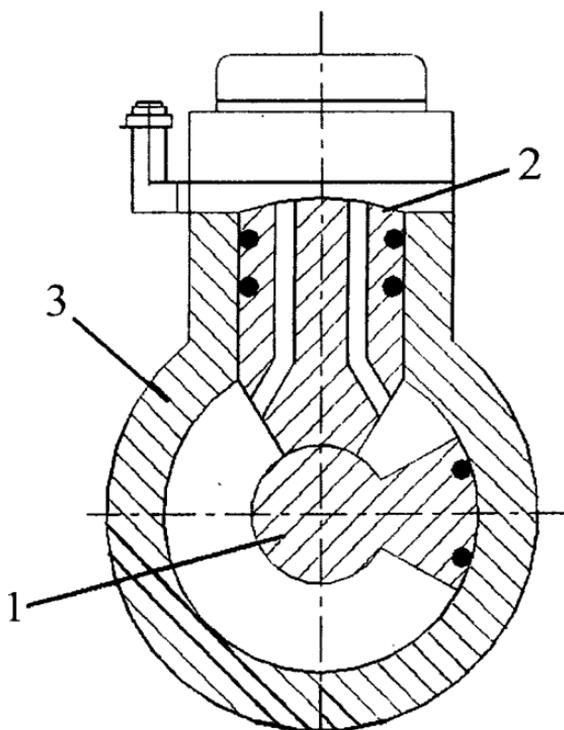


Рис. 1.28. Схема неполноповоротного гидродвигателя:
1 — вал; 2 — золотник; 3 — корпус

Расход жидкости при работе неполноповоротного гидродвигателя зависит от угловой скорости вала ω (рад/с), ширины лопасти b , диаметра рабочей полости D и диаметра вала d :

$$Q = \frac{\omega \cdot b \cdot (D^2 - d^2)}{8}.$$

Давление в рабочей полости неполноповоротного гидродвигателя рассчитывают по формуле:

$$P = \frac{8 \cdot M}{b \cdot (D^2 - d^2)},$$

где M — вращающий момент на валу двигателя.

Для линейного перемещения звена робота применяют гидроцилиндр (рис. 1.29). Он состоит из корпуса (1), внутри которого перемещается поршень (2) со штоком (3). Рабочая жидкость поступает через отверстия (4). Левую полость гидроцилиндра называют поршневой, а правую — штоковой.

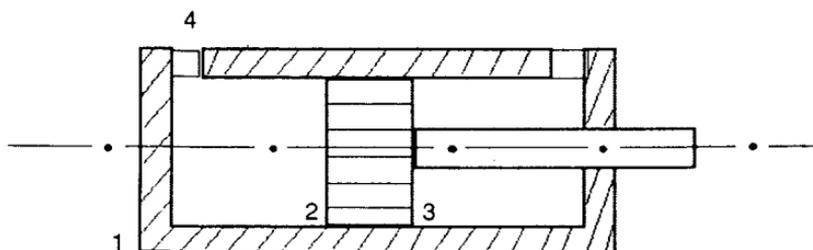


Рис. 1.29. Устройство гидроцилиндра :
 1 — корпус; 2 — поршень; 3 — шток;
 4 — отверстие для рабочей жидкости

Расход жидкости в гидроцилиндре вычисляют, умножая скорость перемещения штока на площадь поршня S :

$$Q = V \cdot S,$$

Для предотвращения вибраций штока его длина не должна превышать 18–20 диаметров поршня D :

$$l/D \leq 18 \div 20.$$

Направление перемещения поршня зависит от того, в штоковую или поршневую полости подается рабочая жидкость. Усилие F на штоке зависит от разности давлений в поршневой P_1 и штоковой P_2 полостях:

$$F = (S + s) \cdot P_1 - S \cdot P_2,$$

где $(S + s)$ — площадь сечения поршня; s — площадь сечения штока.

При одинаковом давлении в обеих полостях поршень гидроцилиндра будет двигаться вправо, вытесняя рабочую жидкость из штоковой полости, поскольку площадь сечения поршня больше разности площадей сечений поршня и штока.

Гидропривод может быть построен по одной из трех схем:

- с постоянными производительностью гидронасоса и давлением жидкости в системе;
- с постоянным давлением жидкости в системе и переменной производительностью гидронасоса;
- с переменными давлением жидкости в системе и производительностью гидронасоса.

Первые две схемы называют *гидроприводом дроссельного управления*, а третью — *гидроприводом объемного управления*.

В более распространенном гидроприводе дроссельного управления переключение потока рабочей жидкости от напорной магистрали в штоковую или порш-

невую полости гидроцилиндра осуществляют с помощью гидрораспределителя. В робототехнике применяют гидрораспределители с электрическим управлением (электрогидрораспределители).

Электрогидрораспределитель представляет собой цилиндрический корпус (1) с пятью отверстиями, внутри которого под действием электромагнитов (2) перемещается золотник (3), представляющий собой вал с двумя цилиндрическими насадками (рис. 1.30).

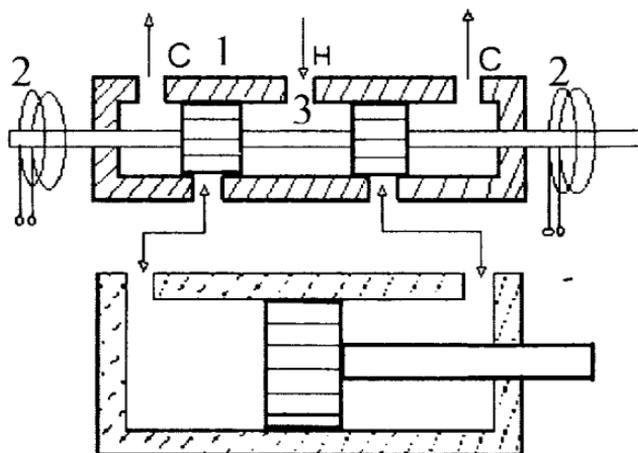


Рис. 1.30. Устройство электрогидрораспределителя:
1 — корпус; 2 — обмотки электромагнитов; 3 — золотник

Напорная магистраль Н подключена к среднему отверстию, а сливная С — к двум крайним. Если ни в одну из обмоток не подают напряжение, золотник находится в нейтральном положении и жидкость не поступает ни в одну из полостей гидроцилиндра. При подаче напряжения в левую обмотку золотник перемещается влево и жидкость из напорной магистрали подается

в поршневую полость. Поршень движется вправо, вытесняя рабочую жидкость в сливную магистраль. При подаче напряжения в правую обмотку золотник перемещается вправо и рабочая жидкость из напорной магистрали подается в штоковую полость, поршень движется влево, вытесняя рабочую жидкость через гидрораспределитель в сливную магистраль. В гидроприводе дроссельного управления (рис. 1.31) рабочая жидкость забирается из бака (1) через фильтр (2) с помощью гидронасоса (3) переменной производительности, снабженного электродвигателем (5) и регулятором производительности (4).

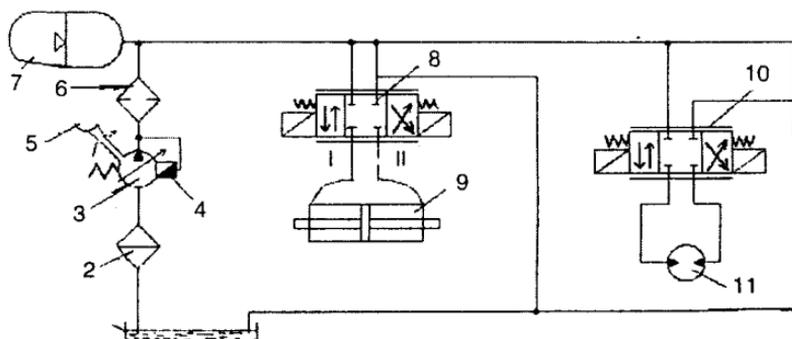


Рис. 1.31. Гидропривод дроссельного управления:

- 1 — вал; 2 — фильтр; 3 — гидронасос;
- 4 — регулятор подачи насоса; 5 — электродвигатель;
- 6 — фильтр; 7 — пневмогидроаккумулятор;
- 8, 10 — золотниковый распределитель;
- 9 — гидроцилиндр; 11 — гидромотор

Затем жидкость проходит через фильтр тонкой очистки 6 и пневмогидравлический аккумулятор (7), служащий для сглаживания бросков давления в магистрали при подключении и отключении гидродвигателей. Пневмогидравлический аккумулятор разделен на

две части упругой мембраной. В его левой полости находится сжатый воздух. Правая часть соединена с напорной магистралью. При уменьшении давления в напорной магистрали мембрана под действием сжатого воздуха изгибается вправо, увеличивая давление. При увеличении давления мембрана изгибается влево, уменьшая давление в магистрали.

В качестве гидродвигателя может быть использован гидроцилиндр (9) с золотниковым гидрораспределителем (8) или гидромотор (11) с золотниковым гидрораспределителем (10). В положении гидрораспределителя I шток гидроцилиндра движется вправо, в положении II — влево. В нейтральном положении гидрораспределителя звено манипулятора неподвижно.

Для всех типов гидродвигателей потребляемая мощность:

$$N = \frac{P \cdot Q}{60},$$

где P — давление в гидросистеме, МПа; Q — расход жидкости, л/мин:

$$Q = (q \cdot n \cdot 10^{-3}) / \eta,$$

где n — линейная скорость, м/мин; q — удельный расход жидкости, см³/м; $\eta = 0,8$ — объемный коэффициент полезного действия.

Теоретический КПД дроссельного гидропривода с насосом переменной производительности:

$$\eta = \frac{N_{\text{вых}}}{N_{\text{вх}}} = \frac{2/3 \cdot (F_{tr} \cdot V_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{об}} \cdot \eta_{\text{дав}} \cdot \eta_y / \sqrt{3})}{P_{tr} \cdot V_{\text{max}} / \sqrt{3}} = 2/3 \cdot (0,85 \cdot 0,80 \cdot 0,90) = 0,4,$$

где P_{tr} — усилие сопротивления перемещению штока; $\eta_{\text{об}}$, $\eta_{\text{дав}}$, η_y — коэффициенты учета потерь объема, давления и энергии; V_{max} — скорость штока без нагрузки.

В роботостроении считается перспективным переход к гидроприводу объемного управления (рис. 1.32). Идея объемного управления состоит в том, что штоковую и поршневую полости гидроцилиндра (2) соединяют гидронасосом (1), который может вращаться в обе стороны при изменении направления вращения электродвигателя (3).

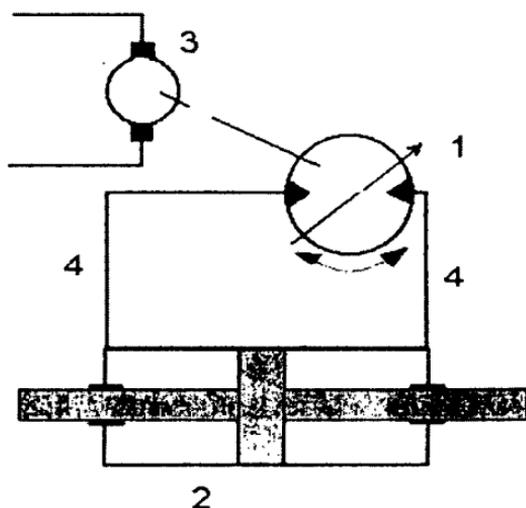


Рис. 1.32. Схема гидропривода объемного управления:
 1 — гидронасос; 2 — гидроцилиндр; 3 — электродвигатель;
 4 — гидромагистраль

При вращении в одну сторону гидронасос перекачивает рабочую жидкость по гидромагистрالي (4) из штоковой в поршневую полости, а при вращении в другую сторону рабочая жидкость перекачивается из поршневой в штоковую полости. В результате меняется направление перемещения штока гидроцилиндра.

Ведутся работы над применением в гидроприводе электрореологических жидкостей, представляющих

собой суспензию металлических частиц диаметром 0,001 мм в масляной среде. На гидроцилиндр надевают катушку так, что он представляет собой электромагнит, внутри которого находится электрореологическая жидкость. Если на обмотку катушки подать напряжение, то жидкость затвердевает в течение миллисекунд. Движение штока прекращается в момент подачи напряжения.

Пневмопривод обладает простотой и надежностью, высоким быстродействием (до 1000 мм/с при линейном и до 60 об/мин — при вращательных движениях), простым и точным позиционированием звеньев по перемещаемым механическим упорам, устойчивостью к агрессивной среде, низкой стоимостью. Его недостатки: зависимость скорости от нагрузки из-за сжимаемости воздуха, удары звеньев об упоры, шум при работе, сложность промежуточной остановки между двумя точками позиционирования.

Для перемещения звеньев роботов применяют пневмоцилиндры или мембранные камеры. Пневмоцилиндр состоит из корпуса (1), в котором перемещается поршень (2) (рис. 1.33).

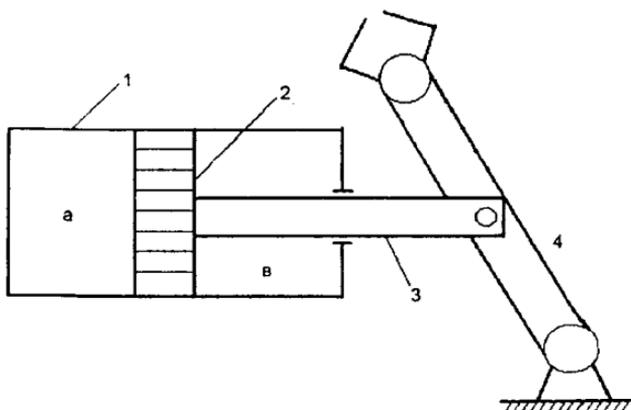


Рис. 1.33. Пневмоцилиндр

К поршню прикреплен шток (3), соединенный со звеном робота (4). При подаче сжатого воздуха в поршневую (а) или штоковую (в) полости пневмоцилиндра поршень перемещается вправо или влево, перемещая за собой звено робота.

Выбор пневмоцилиндра зависит от усилия F на штоке, диаметра D поршня, давления воздуха P и коэффициента уплотнения m между поршнем и цилиндром ($m=1,5$ g — для манжетного уплотнения, $m=1,1 \div 1,3$ — для уплотнения из металлических колец):

$$m \cdot F = \pi \cdot D^2 \cdot P / 4.$$

Баланс сил на штоке пневмоцилиндра описывается уравнением

$$(P_a - P_b) \cdot S = \sum_{i=1}^n N_i,$$

где P_a — давление в полости нагнетания; P_b — давление в полости опорожнения; S — площадь поршня; $\sum N_i$ — сумма сил на поршне.

Мембранная камера представляет собой круглую мембрану, края которой закреплены между металлическими тарелками (рис. 1.34). К центру мембраны прикреплен шток, через уплотнение выходящий наружу. Конец штока соединен со звеном робота. При подаче сжатого воздуха между мембраной и одной из тарелок мембрана изгибается, перемещая штоком звено робота.

Усилие перемещения штока составляет

$$F = \frac{P \cdot \pi}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2),$$

где P — давление сжатого воздуха; r — радиус шайбы, к которой крепится шток; R — радиус защемления мембраны.

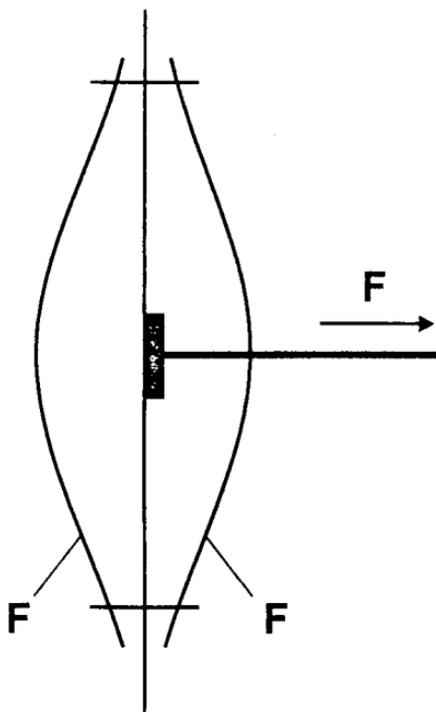


Рис. 1.34. Мембранная камера

Перемещение штока h ограничено степенью деформации мембраны, зависящей от ее радиуса:

$$h = 0,25 \cdot R.$$

Если мембрана не плоская, а волнообразная, то ход штока увеличивается вдвое. При этом соотношение радиусов шайбы и мембраны должно быть

$$r / R = 0,6 \div 0,8.$$

Специально для роботов разработана «искусственная мышца», представляющая собой тонкую резиновую трубку в специальной оплетке (рис. 1.35). Концы оплетки соединены со звеньями манипулятора. При

подаче воздуха в трубку она раздувается, в результате чего оплетка уменьшается в длину, перемещая звено манипулятора.

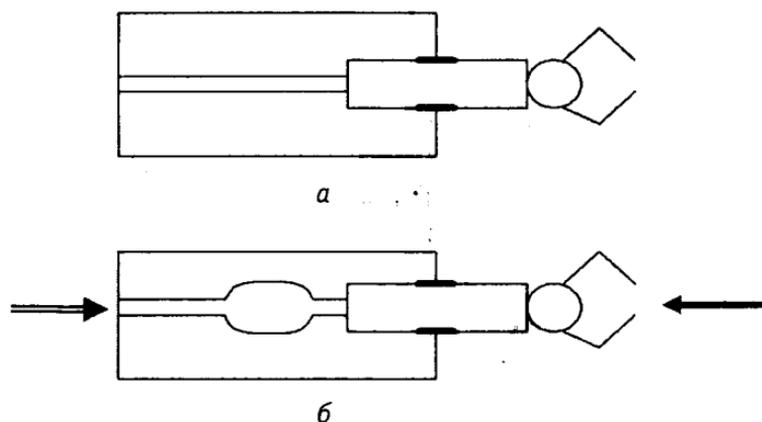


Рис. 1.35. Работа «искусственной мышцы»:

а — до подачи воздуха в трубку;

б — после подачи воздуха в трубку

Для подачи воздуха в полость пневмоцилиндра или мембранной камеры применяют электропневматические клапаны прямого или обратного типов. При подаче напряжения в обмотку электропневматический клапан прямого типа открывает канал подачи воздуха, а клапан обратного типа закрывает канал подачи воздуха. Электропневматический клапан прямого типа (рис. 1.36) выполнен в виде подпружиненного вала с двумя цилиндрическими насадками (золотника), который перемещается в цилиндрическом корпусе с тремя отверстиями. Нижнее отверстие соединено с одной из полостей пневмопривода. Верхнее отверстие соединено с атмосферой. К среднему отверстию подводят сжатый воздух. При подаче напряже-

ния в обмотку золотник перемещается вниз и воздух через нижнее отверстие поступает в рабочую полость пневмопривода.

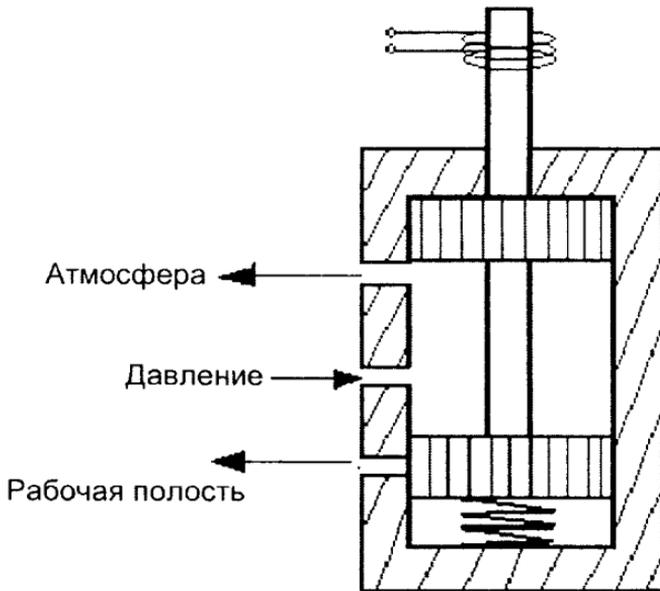


Рис. 1.36. Электропневматический клапан прямого действия

Недостатком пневмопривода является то, что движение звена робота при включении клапана происходит с большой скоростью, сопровождаясь ударами звена об ограничивающие упоры. Для смягчения ударов в упорах устанавливают демпферы, однако это приводит к снижению точности позиционирования. Кроме того, крупным недостатком пневмопривода является сложность остановки штока в промежуточных точках. Остановка звеньев манипулятора в промежуточных точках возможна при применении пневмоцилиндра с несколькими отверстиями, каждое из которых через электропневматический клапан соединено

с атмосферой (рис. 1.37). При открывании одного из клапанов, поршень остановится сразу после прохождения соответствующего отверстия.

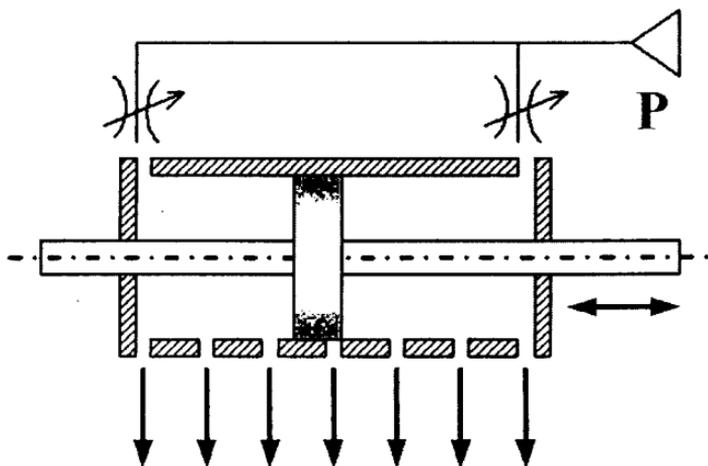


Рис. 1.37. Многопозиционный пневмодвигатель

Для плавного перемещения звеньев применяют электропривод, отличающийся компактностью, быстродействием, равномерностью вращения, повышенной точностью, хорошей управляемостью. Его недостатки: зависимость скорости от нагрузки, необходимость промежуточных передач от вала двигателя к звену робота, взрывоопасность. Различают электроприводы постоянного и переменного тока (рис. 1.38).

Электродвигатели постоянного тока делят на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов и двигатели с электромагнитным возбуждением.

Если у двигателя с электромагнитным возбуждением обмотка возбуждения не соединяется с обмоткой якоря, то такой двигатель называют двигателем с независимым возбуждением. Его скорость незначительно снижается при увеличении нагрузки. Если обмот-



Рис. 1.38. Классификация электродвигателей

ка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, то такой двигатель называют двигателем последовательного возбуждения или сериесным двигателем. Его скорость снижается при увеличении нагрузки и значительно возрастает при снятии нагрузки. Снимать нагрузку с таких двигателей опасно. Если двигатель имеет последовательную и параллельную обмотки возбуждения, то такой двигатель называют

двигателем смешанного возбуждения или компаундным двигателем. Зависимость скорости от нагрузки на валу двигателя, или механическая характеристика определяется соотношением токов через параллельную и последовательную обмотки. Скорость двигателей постоянного тока регулируют вводом сопротивления в цепь двигателя или изменением напряжения, приложенного к обмоткам.

При разработке электроприводов роботов чаще всего применяют электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов и шаговые двигатели. У электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов N , S на вращающемся якоре имеется обмотка, к которой подводится напряжение U (рис. 1.39).

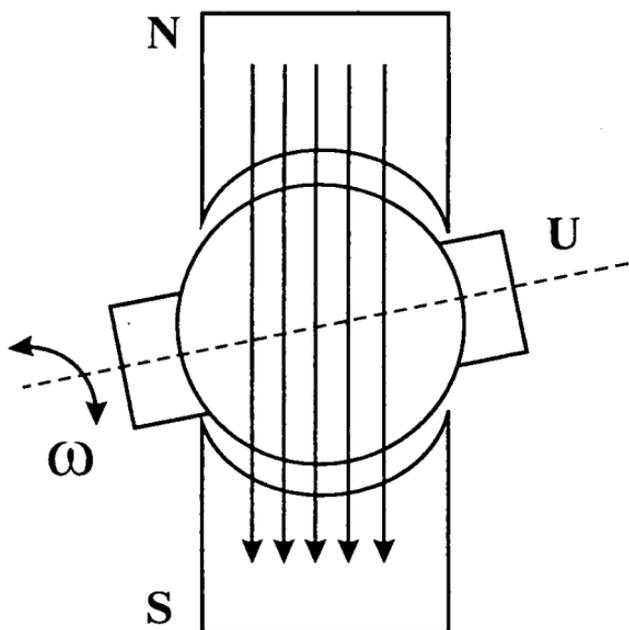


Рис. 1.39. Схема электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов

Вокруг обмотки образуется электромагнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита на статоре. Ротор поворачивается так, чтобы его магнитный поток совпал с направлением магнитного потока статора, по инерции проходит положение равновесия и начинает вращаться относительно статора. Скорость вращения регулируется напряжением U , которое подводится к ротору с помощью щеток. Применение постоянных магнитов из феррита с высокой коэрцитивной силой позволяет создавать малогабаритные высокомоментные двигатели. Для повышения быстродействия ротор выполняют полым.

Ротор шагового двигателя выполнен в виде постоянного магнита (рис. 1.40). На статоре размещены десятки обмоток, к которым подключают постоянное напряжение разной полярности. При подключении противоположных обмоток к напряжению с разной полярностью к ним притягиваются противоположные полюсы постоянного магнита и ротор поворачивается.

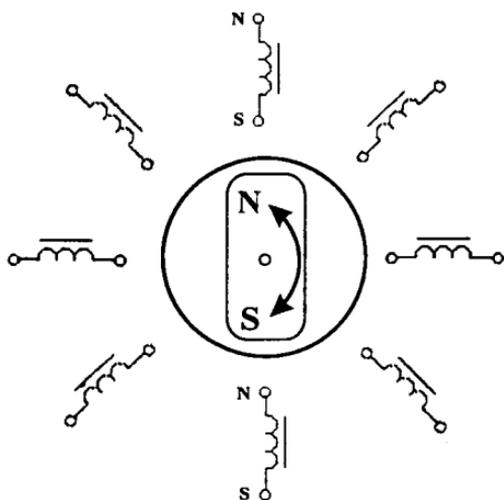


Рис. 1.40. Шаговый электродвигатель

Если число обмоток велико, то поворот ротора происходит с высокой точностью на угол, заданный сочетанием обмоток, к которым приложено напряжение.

Электродвигатели переменного тока делят на **асинхронные** и **синхронные**. Асинхронные двигатели бывают двухфазными и трехфазными. Скорость двухфазного двигателя регулируется напряжением в обмотке управления, смещенной на 90° относительно обмотки возбуждения. Трехфазный двигатель имеет ротор с трехфазной обмоткой или короткозамкнутый ротор в виде «беличьего колеса». На статоре под углом 120° находятся три обмотки, одни концы которых соединены (если применяют схему «звезда»), а другие свободны. При подключении обмоток статора к источнику переменного трехфазного напряжения в статоре образуется вращающееся электромагнитное поле, которое заставляет вращаться ротор. У такого двигателя скорость мало изменяется при увеличении нагрузки, но после превышения некоторого значения ротор двигателя останавливается. После этого начинают нагреваться его обмотки.

Ротор синхронного двигателя выполнен в виде постоянного магнита, как у шагового двигателя, а на статоре размещены три обмотки, как у асинхронного двигателя. Скорость вращения (n) синхронного двигателя зависит только от числа пар полюсов обмотки статора (p) и частоты переменного напряжения (f):

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p}$$

Недостаток электродвигателей вращения — высокая скорость, в то время как звенья робота должны перемещаться с малой скоростью. Для снижения скорости между двигателем и звеном робота приходится ставить механизм снижения скорости — редуктор. Обычные редукторы в виде зубчатых и зубчато-рееч-

ных передач отличаются большими потерями мощности, низкой степенью снижения скорости и неточностью. Для перемещения звеньев роботов с малой скоростью применяют волновой редуктор (рис. 1.41).

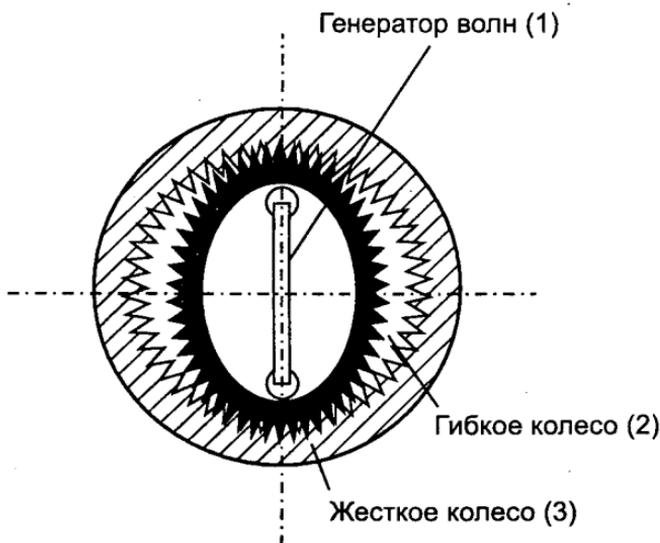


Рис. 1.41. Устройство волнового редуктора

Редуктор состоит из генератора волн (1) эллиптического сечения и гибкого зубчатого колеса (2), которые устанавливаются внутри жесткого зубчатого колеса (3). Гибкое колесо, будучи связанным с генератором волн, принимает форму эллипса. Поэтому его зубцы полностью входят во впадины между зубцами жесткого колеса (3) в двух точках по главной оси эллипса. Оно имеет на несколько зубцов меньше, чем жесткое колесо. Через каждый оборот генератора гибкое колесо поворачивает жесткое колесо на эти несколько зубцов. Если генератор волн соединить с входным валом, а жесткое колесо — с выходным, то обеспечивается очень высокое передаточное отношение.

Расчетную мощность электродвигателя:

$$N = K \cdot M \cdot n \cdot (ПВ)$$

выбирают с учетом относительной продолжительности включения:

$$ПВ = \frac{T_p}{T_u},$$

где M — крутящий момент; n — частота вращения; K — коэффициент потерь в передаче; T_p — время работы; $T_u = T_p + T_o$ — время цикла; T_o — время отключения.

Линейные двигатели переменного тока можно представить как электродвигатель вращения, у которого разрежали и развернули в линию статор с обмотками. При подключении напряжения в статоре образуется бегущее магнитное поле, заставляющее ротор двигаться вдоль статора. Скорость изменяют так же, как в обычных двигателях. Такой привод удобен для порталных роботов с прямоугольной системой координат.

Прецизионные вибродвигатели относятся к классу пьезоэлектрических двигателей и основаны на преобразовании высокочастотных упругих колебаний вибропреобразователя в поступательное или вращательное микроперемещение выходного звена.

Обычно электродвигатель объединяют с системой управления, образуя комплектный электропривод, обеспечивающий: поддержание постоянной скорости при переменных нагрузках и постоянного момента вращения при изменении скорости; переходные процессы без колебаний скорости и тока; высокую точность отработки управляющих воздействий; фиксацию вала электромагнитным тормозом при отключении питания. Комплектные электроприводы делят на разомкнутые и следящие. Разомкнутые приводы состоят из источника питания, электронного коммутатора и двигателя (без об-

ратной связи). Следящие приводы содержат: приемное и следящее устройства, усилитель, датчики обратной связи, источник питания, электродвигатель. Следящие приводы могут быть с релейным или непрерывным управлением. При релейном управлении напряжение на двигатель подается только тогда, когда рассогласование заданного и фактического параметров (скорости, положения звена, ускорения) превышает определенный порог. При непрерывном управлении напряжение зависит от величины рассогласования.

Для включения и выключения электродвигателей малой мощности в робототехнике применяют реле (рис. 1.42)

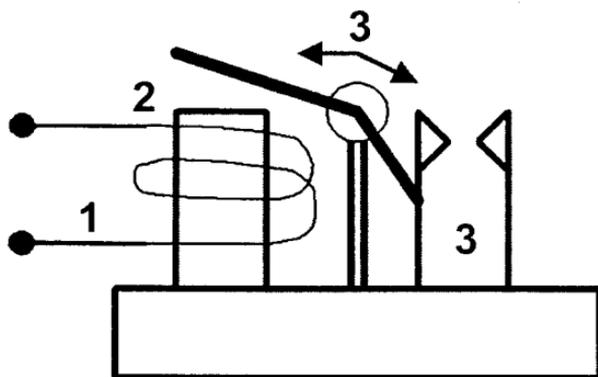


Рис. 1.42. Устройство реле: 1 — обмотка, 2 — сердечник, 3 — якорь, 4 — контактная группа

Реле содержит обмотку (1) на сердечнике (2) и якорь (3) с контактной группой. При приложении напряжения к обмотке якорь притягивается к сердечнику, замыкая или размыкая контакты в контактной группе. Мощные электродвигатели включают и выключают контакторами, которые отличаются от реле увеличенным во много раз током в обмотке, одним контактом и наличием дугогасительной камеры.

1.6. СБАЛАНСИРОВАННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ

Такие манипуляторы применяют для погрузки, переноса и разгрузки тяжелых грузов. Кинематика манипулятора построена так, что груз на захватном устройстве удерживается неподвижно в любой точке рабочей зоны. В отличие от робота, сбалансированный манипулятор не имеет перепрограммируемой системы управления. Оператор рукой перемещает захватное устройство, поднимая и перенося груз в нужное место.

Для подъема груза служит привод вертикального перемещения, включаемый оператором. Для переноса груза в горизонтальной плоскости необходимо преодолеть только силы трения в соединениях звеньев. Манипуляторы с электромеханическим и пневматическим приводами используют для грузов массой до 150 кг. Для перемещения грузов массой до 2 500 кг применяют гидропривод.

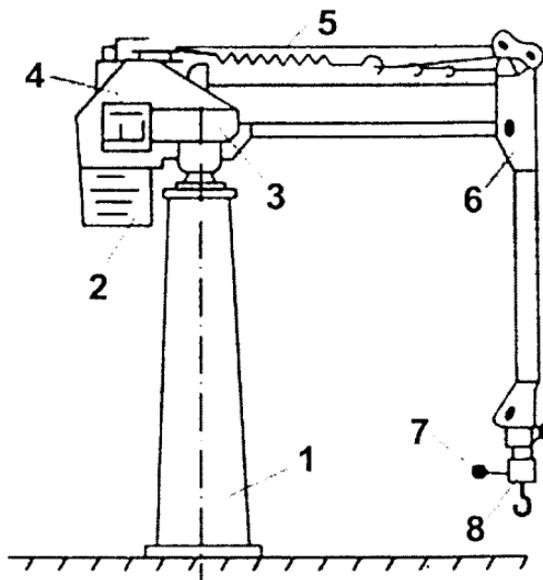


Рис. 1.43. Сбалансированный манипулятор

Сбалансированный манипулятор (рис. 1.43) содержит: основание (1); установленную на нем головку (4), которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси; исполнительное устройство (6) с крюком (8) на конце; привод (3) вертикального перемещения; устройство уравновешивания (5) и устройство управления (2). Задающий орган в виде рукоятки (7) оператора размещен на захватном устройстве (8). Скорость подъема груза регулируется углом поворота рукоятки (7). Перемещение груза в горизонтальной плоскости осуществляется поворотом головки (4) вокруг оси и ручным перемещением захватного устройства (8). Кинематика сбалансированного манипулятора обеспечивает три степени подвижности: вверх-вниз, вперед-назад, поворот вправо и влево. Она построена на основе пантографа с горизонтальной (точка С) и вертикальной (точка А) направляющими (рис. 1.44).

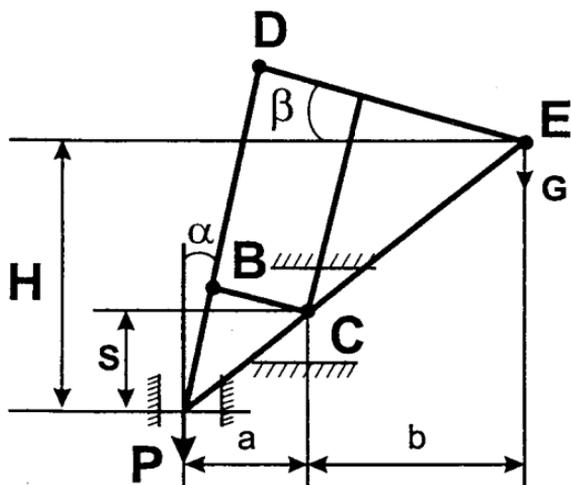


Рис. 1.44. Пантограф сбалансированного манипулятора

При неподвижной точке A высота подъема груза G
 $H = (A \cdot B \cdot \cos \alpha - B \cdot C \cdot \sin \beta) + (C \cdot F \cdot \cos \alpha - E \cdot F \cdot \sin \beta)$ (1.1)

Треугольники ABC и CFE подобны, откуда

$$\frac{C \cdot F}{A \cdot B} = \frac{E \cdot F}{B \cdot C} = k. \quad (1.2)$$

После подстановки CF и EF из (1.1) в (1.2) при условии

$$A \cdot B \cdot \cos \alpha - B \cdot C \cdot \sin \beta = S$$

найдем, что

$$H = (k+1) \cdot S.$$

Отсюда следует, что при перемещении точки E подвеса груза высота подъема груза постоянна. При неподвижной точке C

$$\frac{b}{a} = \frac{F \cdot E \cdot \cos \beta + F \cdot C \cdot \sin \alpha}{B \cdot C \cdot \cos \beta + A \cdot B \cdot \sin \alpha} = k.$$

Груз G , подвешенный в точке E , можно уравновесить силой $P = G \cdot b/a$, приложенной в точке A .

Поскольку $\frac{b}{a} = const$,

то сила P уравновешивания не зависит от положения точки E . Если точки A, C подвижны, то для перемещения груза в рабочей зоне достаточно преодолевать силы трения в сопряжениях звеньев манипулятора.

На рис. 1.45 показаны схемы пантографов с 3-мя ($a, б$) и 4-мя ($в, г$) рабочими точками, применяемых в сбалансированных манипуляторах. В процессе движения манипулятора рабочие точки должны лежать на одной линии.

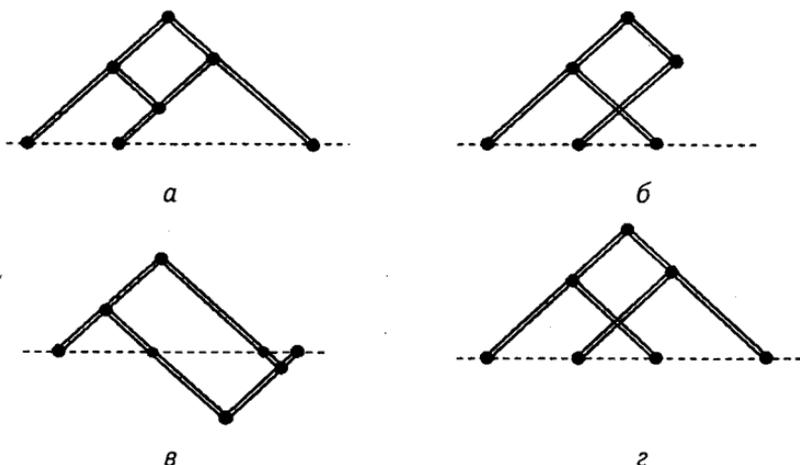


Рис. 1.45. Схемы пантографов сбалансированных манипуляторов с 3-мя (а, б) и 4-мя (в, г) рабочими точками

При напольной установке манипулятора для обслуживания заданной рабочей зоны S выбирают схему пантографа, в которой средняя рабочая точка C выше крайней рабочей точки A , к которой прикладывается сила для уравнивания груза в точке E (рис. 1.46, а). При подвесной установке манипулятора выбирают схему, в которой точка C расположена ниже точки A (рис. 1.46, б). В обеих схемах точки A , C , E должны лежать на одной прямой.

На точность останковки груза при подъеме влияет минимальная скорость вертикального перемещения захватного устройства. Ее выбирают из условия, что перемещение груза от получения оператором визуальной информации до подачи команды останковки с учетом движения груза на участке торможения не должно превышать допустимой погрешности позиционирования (около 1 мм):

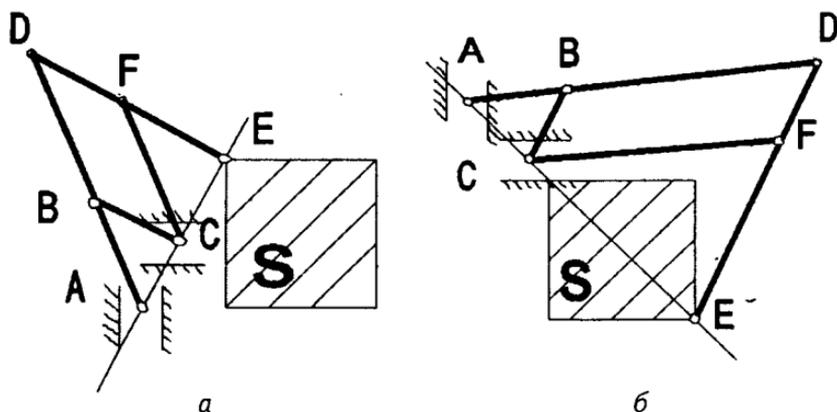


Рис. 1.46. Рабочая зона S для напольного (а) и подвешенного (б) сбалансированного манипулятора

$$\Delta S = V \cdot [t_p + (0,3 \dots 0,5) \cdot t_m],$$

где t_p — время реакции оператора (0,2 с); t_m — время торможения (около 0,2 с).

Отсюда $V = 0,003 - 0,004$ м/с. Максимальную скорость выбирают в зависимости от высоты H рабочей зоны и безопасности работы. Для манипуляторов грузоподъемностью 100–250 кг при $H = 2$ м увеличение скорости более 0,35 м/с практически не приводит к повышению производительности. Для тяжелых манипуляторов $V \leq 0,2$ м/с. Время рабочего цикла «взять-перенести-поставить» на различных операциях изменяется от 10–20 с до нескольких минут.

В качестве захватных устройств в сбалансированных манипуляторах используют крюки и петли, эксцентриковые и рычажковые механизмы. Эксцентриковое захватное устройство для подъема листов большой площади (рис. 1.47) состоит из скобы (1) с рабочей поверхностью (2) и эксцентрика (3), вращающегося относительно скобы на оси (4) и поджимаемого пружиной к поверхности (2).

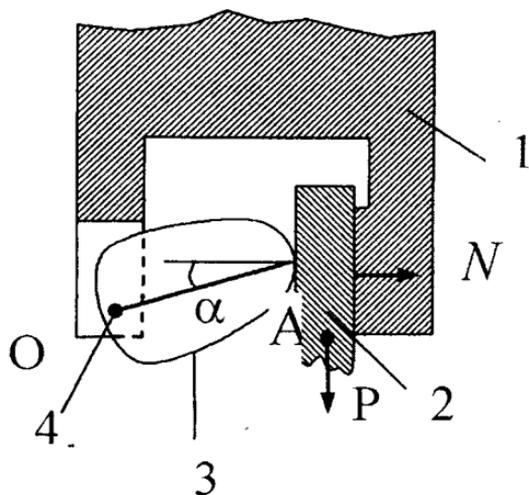


Рис. 1.47. Эксцентриковое захватное устройство

Груз P удерживается силой трения в точке A контакта с эксцентриком при соблюдении условия:

$$M_{тр} \geq M_n$$

или

$$N \cdot K_{mp} \cdot d \cdot \cos \alpha \geq N \cdot d \cdot \sin \alpha, \quad d = AO,$$

откуда

$$K_{mp} \geq \operatorname{tg} \alpha$$

и, поскольку

$$K_{mp} = \operatorname{tg} \rho,$$

то

$$\rho \geq \alpha,$$

где M_n — момент силы прижатия груза относительно оси O ; α — угол между нормалью к поверхности эксцентрика в точке касания с грузом и прямой AO ,

соединяющей точку касания с осью вращения эксцентрика; ρ — угол трения; N — усилие захвата.

Для гладких поверхностей $\rho=5^\circ \div 7^\circ$, при насечке поверхности эксцентрика $\rho \geq 25^\circ$.

В отличие от широко применяемых тельферных кранов, сбалансированный манипулятор способен точно позиционировать груз в закрытом сверху пространстве. Усилие оператора при подъеме сбалансированным манипулятором груза до 100 кг не превышает 50 Н, до 250 кг — 100 Н. Сбалансированные манипуляторы применяют в единичном и мелкосерийном производстве. Первые манипуляторы применялись для загрузки и разгрузки металлорежущих станков и кузнечно-прессового оборудования. Сейчас область их применения расширяется на процессы зачистки, сверления, шлифования поверхностей установленным в захватном устройстве инструментом, сборки тяжелых деталей, загрузки стеллажей, загрузки гальванических ванн, гибки пластмассовых труб, резки металлической пилой, разлива металла, загрузки — разгрузки мешков, перегрузки мешков. Десятки моделей сбалансированных манипуляторов применяются в различных отраслях для механизации тяжелых работ. Создают сбалансированные манипуляторы, способные перемещаться на тележках [8].

1.7. ТРАНСПОРТНЫЕ РОБОТЫ

Транспортный робот или робокар представляет собой грузонесущую тележку, которая может автоматически перемещаться между единицами технологического оборудования. Его применение обеспечивает высокую маневренность в узких проходах цеха, простое изменение маршрута при изменении технологии и отказах оборудования, оптимизацию грузопотоков. По способу перемещения грузов выделяют робокары:

— с бортовым манипулятором для погрузочно-разгрузочных операций;

— буксирующие одну или несколько тележек (робокары-тягачи);

— перемещающие грузы, помещенные на тележку стационарным роботом.

По способу применения различают работу робокара в режимах «такси» и «платформа». В режиме «такси» деталь снимают с робокара в месте обработки, затем укладывают на робокар. В режиме «платформа» деталь обрабатывают, не снимая с робокара.

По способу передвижения робокары могут быть колесно-напольными, колесно-рельсовыми, гусеничными, шагающими и на воздушной подушке. Наиболее распространены колесно-напольные робокары с тремя колесами, переднее из которых является управляемым и ведущим. Применяют также транспортные роботы с опускающимся захватным устройством, движущиеся по монорельсу. Колесные механизмы передвижения применяют для относительно ровных поверхностей, где не нужно контролировать реакцию опоры на нагрузку.

Для естественной поверхности со случайными неровностями требуются шагающие механизмы, способные, подобно живым существам, выбирать точки контакта с неровной поверхностью. Неподвижный аппарат устойчив, если он имеет не менее трех ног. В процессе ходьбы требуется, по крайней мере, четыре ноги. При этом система управления должна выбирать направление перемещения центра тяжести шагающего аппарата и закон изменения скоростей свободных ног и опорных конечностей.

Кинограммы движения четырехногих животных показали, что в процессе перемещения на опорной поверхности находятся попеременно по две ноги. Равновесие при движении поддерживается за счет динамической балансировки тела. Динамическая балансировка — это изменение центра тяжести тела в процессе движения.

Для статической балансировки двух ног недостаточно. В отличие от колесных механизмов, центр тяжести шагающего механизма с числом ног менее шести должен перемещаться по вертикали при движении. Интересно, что управление роботами с шестью и более ногами становится проще, так как при этом не требуется балансировать центр тяжести в процессе ходьбы.

Для выполнения шага нога робота должна иметь не менее двух степеней подвижности: подниматься вверх-вниз и поворачиваться относительно корпуса. Подъем ноги может быть осуществлен путем ее поворота подобно ноге человека. Цикл управления шагом одной ноги состоит из 9 операций прохождения опоры, восстановления и вынесения ноги (рис. 1.48). При таком управлении робот перемещается прямолинейно. Для поворотов необходима третья степень подвижности каждой ноги. Автоматическое движение ноги разбивается на состояния свободного расслабления, сокращения, удлинения и жесткой фиксации. Такое управление позволяет организовать перемещение шагающего аппарата с любым числом ног.

Наиболее распространены шестиногие аппараты, в которых проще обеспечивается статическая устойчивость. С практической точки зрения, шестиногие аппараты легче преодолевают сложные препятствия. Двуногие аппараты, шагающие подобно человеку, требуют согласованного управления 11 степенями подвижности ноги и центра тяжести корпуса. Сложность состоит в том, что при подъеме одной ноги центр тяжести корпуса должен переноситься на другую ногу. Имеются разработки одноногих прыгающих роботов, не имеющих статической устойчивости и сохраняющих динамическую устойчивость за счет наклона корпуса относительно ноги. В отличие от колесных, шагающий робот способен преодолевать сложные препятствия, шагать по распределенным опорам, менять наклон платформы.

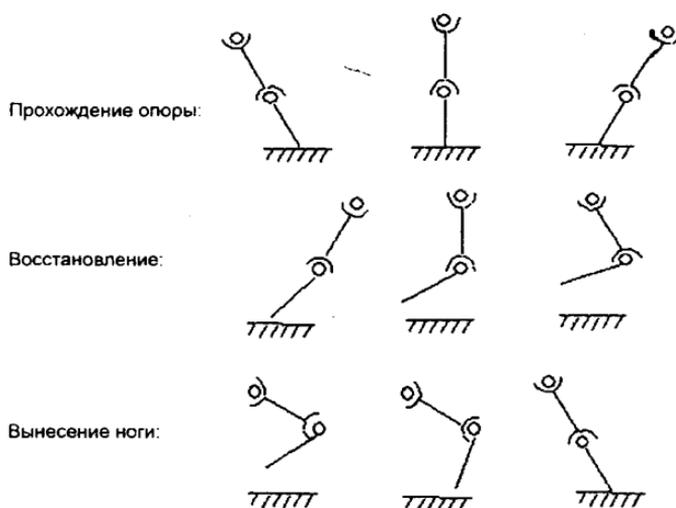


Рис. 1.48. Последовательность управления шагающим механизмом [9]

Управление двуногим шагающим механизмом массой осуществляется в следующей последовательности (рис. 1.49).

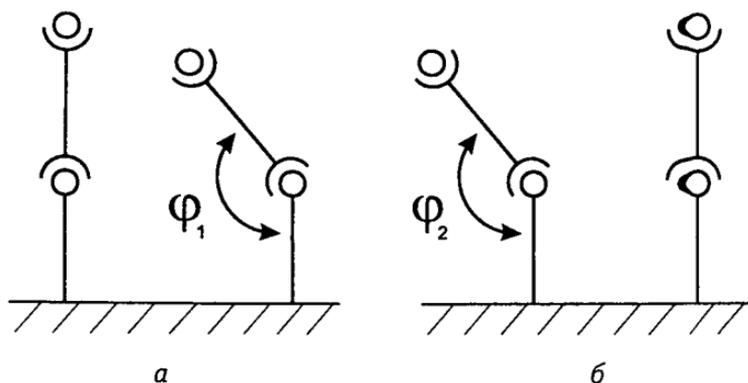


Рис. 1.49. Цикл управления двуногим шагающим роботом

Если одна нога вертикальна, то вторая нога подтягивается и поворачивается на угол φ_1 . Затем первая нога сокращается, вследствие чего масса перемещается по горизонтали и останавливается над ней. Теперь первая нога подтягивается и поворачивается на угол φ_2 . После ее сокращения происходит второй шаг, при котором масса m снова перемещается по горизонтали. Затем цикл шагания повторяется.

При передвижении по неровному грунту шагающий робот затрачивает меньше энергии, чем колесный. Однако по гладкой поверхности колесный робот движется быстрее и экономичнее. В нем используются отработанные принципы колесных движителей.

Транспортная система с применением робокаров обеспечивает: перемещение робокара по заданной траектории (маршрутослежение), определение положения робокара на маршруте, выбор направления движения на разветвлениях, регулирование скорости робокара, обеспечение безопасности движения.

Траекторию движения робокара задают с помощью механической направляющей, информационной трассы или методом автономной навигации.

Механическая направляющая представляет собой рельсы или швеллер (рис. 1.50, а). Маршрут движения формируется переключением стрелочных переводов. Такой способ применяют для колесно-рельсовых и подвесных робокаров.

Чаще всего применяют информационную трассу — линию на полу, над которой движется транспортный робот. Информационная трасса представляет собой проводник, по которому пропускают переменный ток частотой 5–50 кГц (рис. 1.50, б). Вокруг проводника образуется переменное электромагнитное поле.

На днище робокара с двух сторон от продольной оси симметрично установлены две приемные катушки, в которых наводится излучаемое проводником напряжение. Напряжение в обеих катушках сравнива-

ют друг с другом. Если они отличаются, то формируется сигнал поворота робокара до тех пор, пока робокар не станет двигаться точно над проводником и напряжение в катушках не станет одинаковым.

В чистых цехах в качестве информационной трассы используют светоотражающую полосу на полу, по которому движется робокар (рис. 1.50, в). На днище робокара размещают источник света и пару фотоприемников. При движении вдоль полосы сигналы с фотоприемников одинаковы и робокар продолжает движение. Если робокар отходит от полосы, то сигналы фотоприемников становятся разными. В зависимости от их рассогласования формируется сигнал поворота робокара до тех пор, пока робокар не вернется на трассу и сигналы не станут одинаковыми. Если сигналы фотоприемников исчезают, то подается команда аварийной остановки транспортного робота. Для защиты от влияния осветительных приборов система маршруто-слежения может работать в инфракрасном или ультрафиолетовом диапазонах.

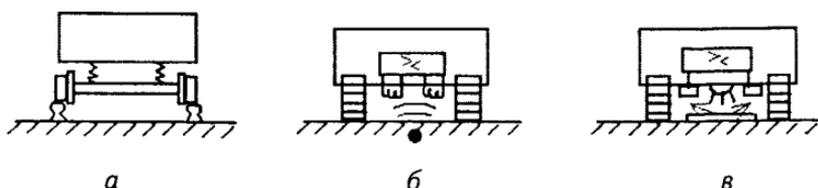


Рис. 1.50. Ориентации робокара по механической направляющей (а), излучающему проводнику (б) и светоотражающей полосе (в)

Метод автономной навигации робокара не требует прокладки направляющих и позволяет гибко изменять маршрут. Для этого используют: запись траектории движения в память бортового компьютера с контро-

лем отклонений от заданной траектории по сигналу бортового гироскопа и датчика пройденного пути; коррекцию отклонений от траектории по лазерным, оптическим или магнитным маякам в заданных местах трассы; запись карты помещения в память бортового компьютера и ориентацию с помощью системы технического зрения и датчиков курса; контроль и корректировку положения робота на маршруте с помощью стационарных устройств.

Способ навигации по датчику курса [9] состоит в том, что на полу вдоль трассы размещают контрастные маркеры, чаще всего треугольники (рис. 1.51). На днище робота устанавливают видеодатчик, направленный на пол. По фактическому положению маркера относительно заданного система навигации определяет линейное x и угловое γ отклонения от курса y , в соответствии с которыми формирует команду на сервопривод поворота робота. Робот будет поворачивать до тех пор, пока фактическое положение не станет совпадать с заданным.

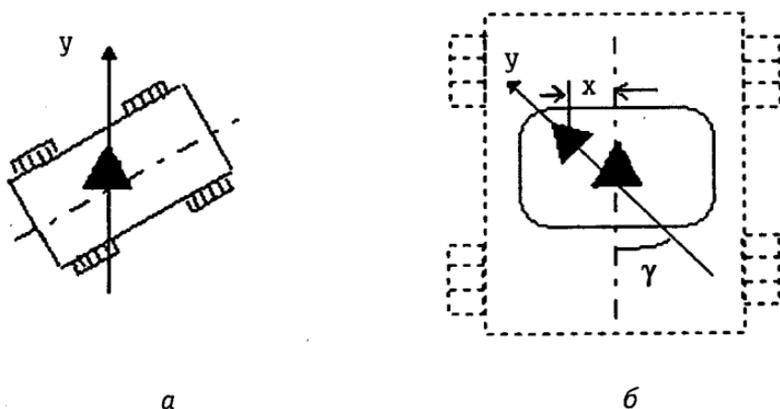


Рис. 1.51. Автономная навигация колесного робота по маркерам вдоль трассы: а — положение маркера на трассе; б — отображение маркера бортовой системой технического зрения

Для автоматического поиска транспортным роботом проходов в помещениях с препятствиями применяют вращающийся дальномер, установленный на борту робота (рис. 1.52, а). Вместо него может быть применен панорамный дальномер, представляющий собой множество дальномеров, размещенных по окружности (рис. 1.52, б). На основе измерения расстояний до препятствий в зависимости от угла поворота дальномера бортовой компьютер непрерывно формирует карту местности вокруг робота для отыскания проходов между препятствиями.

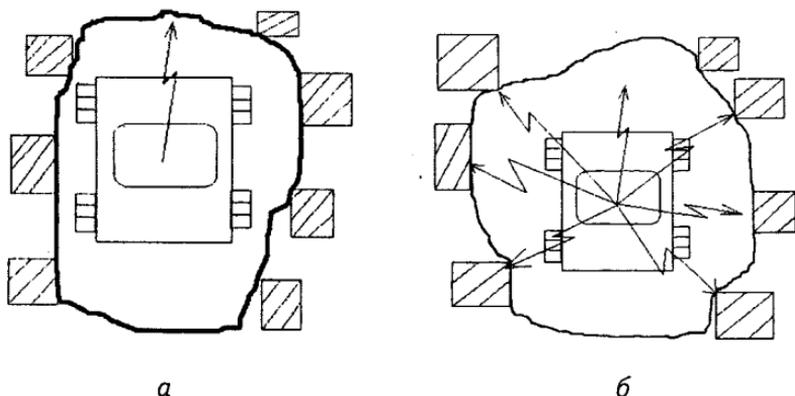


Рис. 1.52. Формирование карты местности при автономной навигации: *а* — вращающимся дальномером; *б* — панорамным дальномером

Созданы образцы автономных роботов для работы под водой, манипулирования тяжелыми предметами, мытья полов, сварки крупных конструкций. Разработаны роботы массой 50 кг, способные двигаться по стене с помощью вакуумных присосок и вести сварку вертикального шва. Проведены испытания робота-вертолета для обзора местности, съемок фильмов сверху, охраны территорий, осмотра строений, измерения

выбросов предприятий, поддержки спасательных операций. Образец автономного робота с панорамным дальномером и стереотелекамерами может управляться оператором на больших расстояниях в режиме виртуальной реальности. Особое внимание уделяется навигации наземных роботов. Немецким обществом математики и переработки данных разработана навигационная система для обхода автономным роботом препятствий в закрытом помещении. Система построена на фаззи-логике, преобразующей точные показания ультразвуковых датчиков в нечеткую лингвистическую информацию «вблизи», «обойти слева».

Институтом робототехники Университета Карнеги-Меллон (США) создан автономный наземный робот с нейронной сетью, который воспринимает внешнюю среду с помощью бортовой телекамеры и распознает состояния среды путем обработки визуальной информации многослойной нейронной сетью. Обучение сети при движении робота со скоростью 80 км/час ведется оператором на расстоянии 90 миль. Через 3 минуты обучения сети робот способен двигаться самостоятельно. На подобном роботе APRA лаборатория навигации Института робототехники применила навигационный комплекс из лазерных дальномеров, ультразвуковых локаторов и стереотелекамер. Среда отображается на уровнях грубой локации препятствий, описания крупных объектов, детальной карты. Робот может обходить препятствия и распознавать окружающую местность.

В процессе движения на робокар нужно передавать сигналы заданной скорости и адрес пункта назначения. Для этого изменяют частоту переменного тока в направляющем проводнике, распознают штриховые коды на светоотражающей полосе или передают на робокар радиосигналы. С движущегося робокара передают информацию о характере груза, маршруте следования и появлении отказов. Для этого используют передачу сиг-

налов через направляющий кабель, радиоканал или инфракрасный канал передачи информации в заданных точках маршрута. Перспективной представляется организация обмена информацией с помощью системы радиочастотной идентификации (RFID).

Остановка робокара в пунктах погрузки и разгрузки осуществляется с помощью передачи сигнала остановки в заданном месте фотоизлучателями.

Скорость движения робокара составляет около 1 м/с при средней грузоподъемности 500 кг. Обычно на робокаре имеется бортовой аккумуляторный привод колес, вес которого составляет примерно треть веса робокара.

Средства защиты от наезда робокара включают визуальное предупреждение персонала в виде проблескового маячка на вертикальной стойке, стационарное ограждение маршрута движения, систему аварийной остановки. Для обнаружения препятствий на расстоянии 5–10 м применяют локационные ультразвуковые или фотоэлектрические датчики. Для обнаружения препятствий на расстоянии 0,5 ÷ 0,7 м устанавливают эластичный бампер. При наезде на препятствие бампер деформируется и включает датчик аварийной остановки.

В качестве бортовых погрузочно-разгрузочных устройств робокара применяют автоматический манипулятор, вилочное захватное устройство, выдвижную площадку, платформы с рольгангом, толкатели.

Движение нескольких робокаров в гибком производстве организуют зонным, сенсорным или комбинированными способами. При зонном управлении передний робокар переходит в следующую зону после ее освобождения и до того, как в его зону войдет следующий робокар. Сенсорное управление основано на контроле расстояния до впереди идущего робокара бортовым локационным датчиком. Комбинированный способ использует зонное управление для участков с разветвлениями и сенсорное — для прямолинейных участков.

Для выбора направления движения робокара на разветвлениях применяют счетно-импульсный или цифровой методы. При счетно-импульсном методе каждому направлению на ответвлении присваивают порядковый номер и сравнивают его с номером, заданным маршрутом движения. При цифровом методе каждому направлению присваивают двоичный код, который может быть изменен при изменении маршрута движения.

Развитие робокаров идет в направлениях:

- расширение области применения автономной навигации;
- ввод обмена информацией между несколькими робокарами;
- повышение гибкости и безопасности движения;
- снижение стоимости робокара;
- оснащение робокара бортовым манипулятором;
- разработка робокаров для немашиностроительных отраслей, таких как сельское хозяйство, горное дело, строительство.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем манипулятор отличается от других механизмов?
2. Каковы отличительные признаки робота?
3. Чем поколения роботов отличаются друг от друга?
4. Чем вспомогательные роботы отличаются от технологических?
5. Какие задачи выполняют манипуляционные, мобильные и информационно-управляющие роботы?
6. Что такое степень подвижности манипулятора?
7. Как определяется погрешность позиционирования?
8. Что такое погрешность обработки траектории? Для каких технологий она особенно важна?
9. Чем ограничена рабочая зона робота?

10. Чем зона обслуживания отличается от рабочей зоны робота?
11. Что задают конструкторы роботов — зону обслуживания или рабочую зону?
12. Откуда произошло слово «робот»?
13. Каковы предпосылки развития робототехники?
14. В каких направлениях развивается робототехника?
15. Чем транспортные степени подвижности отличаются от ориентирующих степеней подвижности? Для каких объектов достаточно транспортных степеней подвижности?
16. Какие сочетания соединений звеньев имеют цилиндрическая, сферическая, угловая и прямоугольная системы координат?
17. В чем состоят преимущества компоновки SCARA?
18. Как работают манипуляторы компоновок Flex Picker, SPINE, ASEA?
19. В чем заключаются прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов?
20. Почему прямая и обратная задачи кинематики не решаются в режиме реального времени?
21. На какие три группы делят захватные устройства роботов?
22. К какой группе относятся захватные устройства с эластичными камерами?
23. Как притяжные захватные устройства адаптируются к неровностям захватываемого объекта?
24. Сопоставьте достоинства и недостатки трех видов привода звеньев роботов.
25. Чем гидроцилиндр отличается от гидромотора?
26. Как изменять направление движения штока в гидроприводе дроссельного управления?
27. Как изменять направление движения штока в гидроприводе объемного управления?

28. Как устроен электрогидрораспределитель и для какого вида гидропривода он применяется?
29. Как управлять позиционированием звена робота с пневмоприводом?
30. Какие типы электродвигателей применяют в робототехнике?
31. Чем отличаются механические характеристики электродвигателей с параллельным и последовательным возбуждением?
32. Как управлять скоростью синхронного электродвигателя?
33. Как работает волновой редуктор?
34. Чем сбалансированный манипулятор отличается от робота?
35. Какую форму имеет рабочая зона сбалансированного манипулятора?
36. Какое условие должно выполняться при конструировании сбалансированного манипулятора?
37. Чем отличается кинематика напольного и подвесного сбалансированных манипуляторов?
38. Как работает эксцентриковое захватное устройство?
39. Какие задачи выполняет транспортный робот?
40. Чем режим «такси» отличается от режима «платформа»?
41. Как контролируется отход робокара от информационной трассы?
42. Чем метод автономной навигации отличается от метода движения по информационной трассе?
43. Как обеспечить безопасность движения робокара?
44. Чем отличаются счетно-импульсный и абсолютно-цифровой методы выбора направления движения робокара?
45. Как предотвращают столкновения робокаров в автоматизированном цехе?

2. УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ

2.1. СПОСОБЫ И УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ

С позиции управления робот представляет собой электромеханическую систему, состоящую из многозвенной механической конструкции с приводами взаимного перемещения звеньев и перепрограммируемого устройства управления. Следует различать непрерывное и логическое управление объектами.

Непрерывное управление заключается в перемещении звеньев так, чтобы рабочий орган робота двигался по заданной траектории в пространстве. На привод каждого звена подают сигнал, например заданной скорости ω . Этот сигнал преобразуется в напряжение U , приложенное к двигателю. Двигатель начинает вращаться со скоростью Ω и перемещает звено. На перемещение звена влияют внешние возмущения W . Используют фундаментальные принципы разомкнутого управления, управления с компенсацией возмущений и управления по отклонению фактической величины от заданной (рис. 2.1).

При разомкнутом управлении считают, что перемещение звена не зависит от возмущающего воздействия (рис. 2.1, а). Если возмущающее воздействие не меняется, то фактическая скорость перемещения звена $\omega_{\text{факт}}$ будет равна заданной $\omega_{\text{зад}}$.

При управлении с компенсацией возмущений (рис. 2.1, б) измеряют величину возмущающего воздействия W и, в зависимости от нее, изменяют напряжение, приложенное к двигателю так, чтобы фактическая скорость перемещения звена $\omega_{\text{факт}}$ была равна заданной $\omega_{\text{зад}}$. Однако возмущающих воздействий может быть несколько и измерять каждое из них становится сложно. Общее влияние воздействий сказывается на изменении фактической скорости перемещения звена $\omega_{\text{факт}}$.

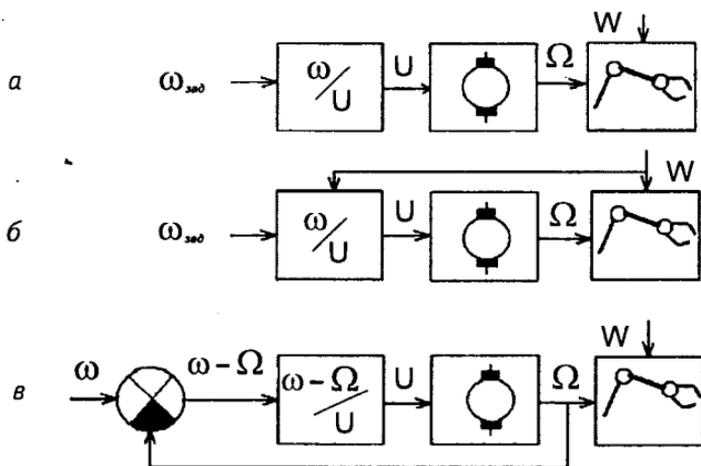


Рис. 2.1. Принципы управления:
 а — разомкнутое; б — с компенсацией возмущений;
 в — по отклонению

При управлении по отклонению (рис. 2.1, в) измеряют только фактическую скорость перемещения звена $\omega_{факт}$, которую сравнивают с заданной скоростью $\omega_{зад}$. Если они не равны, то изменяют напряжение, приложенное к двигателю, до тех пор, пока фактическая скорость не станет равна заданной. Этот принцип чаще всего используют при регулировании.

Система управления роботом имеет четыре уровня (рис. 2.2).

Исполнительный уровень представляет собой системы автоматического управления приводами по всем степеням подвижности. Обычно это системы регулирования по отклонению фактического выхода от заданного. Это единственный уровень, на котором реализуется непрерывное управление.

Тактический уровень формирует величины заданных входов для этих систем. На нем распределяются команды управления приводами исполнительного уров-

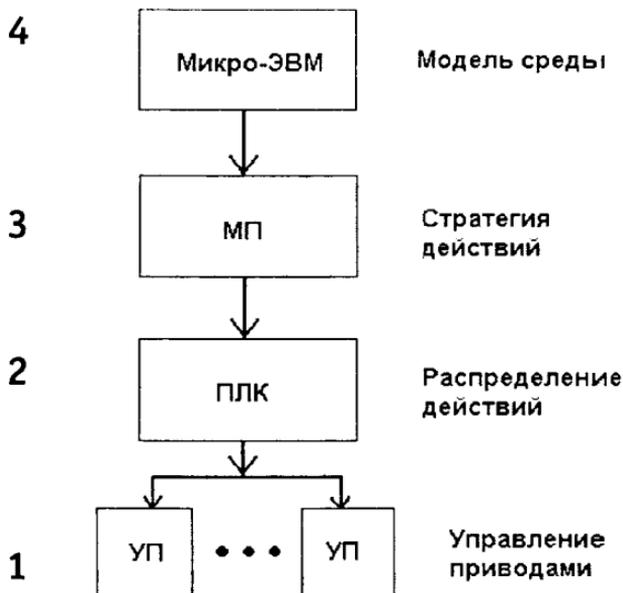


Рис. 2.2. Уровни управления роботом: 1 — исполнительный; 2 — тактический; 3 — стратегический; 4 — интеллектуальный

ня по степеням подвижности робота. Команды вырабатывает программируемый логический контроллер ПЛК, решающий задачу «как делать?».

Стратегический уровень задает алгоритм действий робота, решая задачу «что делать?».

На уровне искусственного интеллекта формируют поведение робота в неорганизованной среде. После классификации неизвестной ситуации в соответствии с поставленной задачей описание ситуации передают на стратегический уровень, где формируют последовательность действий робота. На тактическом уровне команды управления распределяются по системам управления приводами робота.

По виду управления системы управления роботами делят на два класса:

— человеко-машинные, имеющие оператора в контуре управления;

— автоматические, в которых оператор исключается из контура управления и взаимодействует с роботом только на этапе обучения.

Человеко-машинные системы реализуют дистанционное или интерактивное управление. Если при дистанционном управлении оператор управляет всеми операциями рабочего цикла, то при интерактивном управлении одними операциями управляет человек, а другими — автоматическое устройство.

Автоматические системы управления делят на три группы:

— системы программного управления, в которых робот работает по заданной программе, вводимой перед обработкой партии деталей;

— системы адаптивного управления, в которых робот в зависимости от сигналов датчиков выбирает ту или иную программу из устройства адаптивного управления;

— системы интеллектуального управления, в которых робот формирует модель окружающей среды и алгоритм управления в соответствии с поставленной целью и правилами функционирования. Выбор типа автоматического управления зависит от типа технологической среды, в которой будет работать робот. В зависимости от числа признаков состояния среды и робота технологическая среда может быть полностью определенной, организованной или неорганизованной (рис. 2.3).

В полностью определенной среде управление задано для всех комбинаций признаков среды. Например, включается и отключается некоторый механизм с датчиком аварии. Состояние среды характеризуется наличием или отсутствием сигнала с датчика аварии, а состояние объекта — работой или остановкой механизма. Для двух бинарных признаков возможны лишь четыре ситуации (рис. 2.3, а): I — механизм работает,

аварии нет; II — механизм работает, авария есть; III — механизм не работает, аварии нет; IV — механизм не работает, авария есть. В каждой ситуации может быть принято одно из трех решений: для I и IV — ничего не предпринимать; для II — отключить механизм; для III — включить механизм. Управление такого типа реализовано в программных роботах и защите механизмов от перегрузки.

В организованной среде некоторые из ситуаций невозможны по технологическим условиям, поэтому можно задать управление только для подмножества возможных ситуаций, считая, что остальные ситуации никогда не возникнут (за исключением отказов датчиков). В этом случае множество комбинаций признаков среды разбивают на подмножества возможных и невозможных ситуаций (рис. 2.3, б). Перечислить возможные ситуации и задать для них управление можно, если число признаков ситуаций не превышает 5–6. К такому типу относится управление стационарными установками и адаптивными роботами.

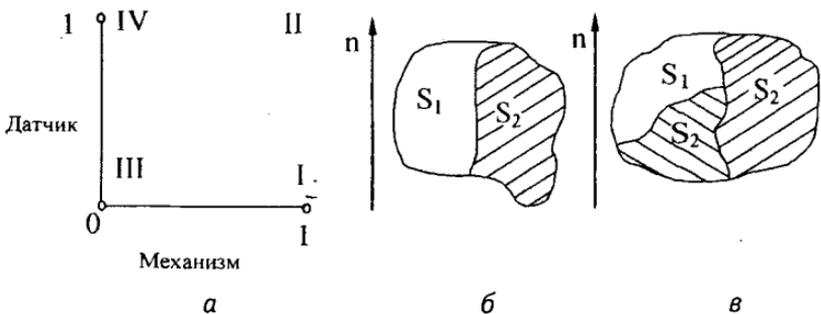


Рис. 2.3. Типы технологической среды:
а — полностью определенная; *б* — организованная;
в — неорганизованная

В неорганизованной среде из-за большого числа признаков среды не удается полностью перечислить множество возможных ситуаций. Это называют «проклятием размерности», когда ввод каждого q -значного признака увеличивает число ситуаций в q раз. Знания о среде приходится формировать путем обучения распознаванию образов. Наблюдая некоторое время за процессом, составляют обучающую выборку из части возможных ситуаций (рис. 2.3, в). Затем отыскивают решающие функции, делящие обучающую выборку на подмножества по числу решений. Эти функции используют для распознавания новых ситуаций из не встречавшихся в обучающей выборке. Конечно, новая ситуация из распознается с некоторой вероятностью ошибки, зависящей от объема обучающей выборки и правильности построения решающих функций. Для работы в таких средах необходимо управление с элементами искусственного интеллекта. В процессе обучения формируют набор признаков среды, необходимый и достаточный для распознавания всех ситуаций из S_1 .

При человеко-машинном управлении оператор дистанционного управления роботом участвует в каждом рабочем цикле робота.

Системы человеко-машинного управления делят на шесть групп (рис. 2.4):

- системы командного управления;
- системы копирующего управления;
- системы полуавтоматического управления;
- системы интерактивного автоматизированного управления;
- системы интерактивного супервизорного управления;
- системы интерактивного диалогового управления.

При командном управлении оператор включает приводы каждого звена робота кнопками на пульте



Рис. 2.4. Классификация систем человеко-машинного управления роботом

управления (рис. 2.5, а). Для каждого привода на пульте имеется пара кнопок для прямого и обратного перемещений звена. С целью ограничения перемещений звеньев в конечных точках ставят механические упоры или концевые выключатели. Такие системы применяют для дистанционного обучения манипулятора, управления манипулятором в прямоугольной системе координат, вывода робота из аварийной ситуации (например, при заклинивании деталей в процессе сборки). Манипуляторы с командным управлением часто используют в обитаемых подводных аппаратах для взятия проб, при перемещениях тяжелых объектов.

При копирующем управлении оператор надевает на руку задающее устройство, кинематически подобное управляемому манипулятору (рис. 2.5, б). В шарнирах задающего устройства установлены измерители угловых перемещений, с помощью которых формируются команды управления приводами звеньев манипулятора. Манипулятор копирует движения руки оператора, совершая операции в рабочей зоне, удаленной от оператора. Первые испытания систем показали не-

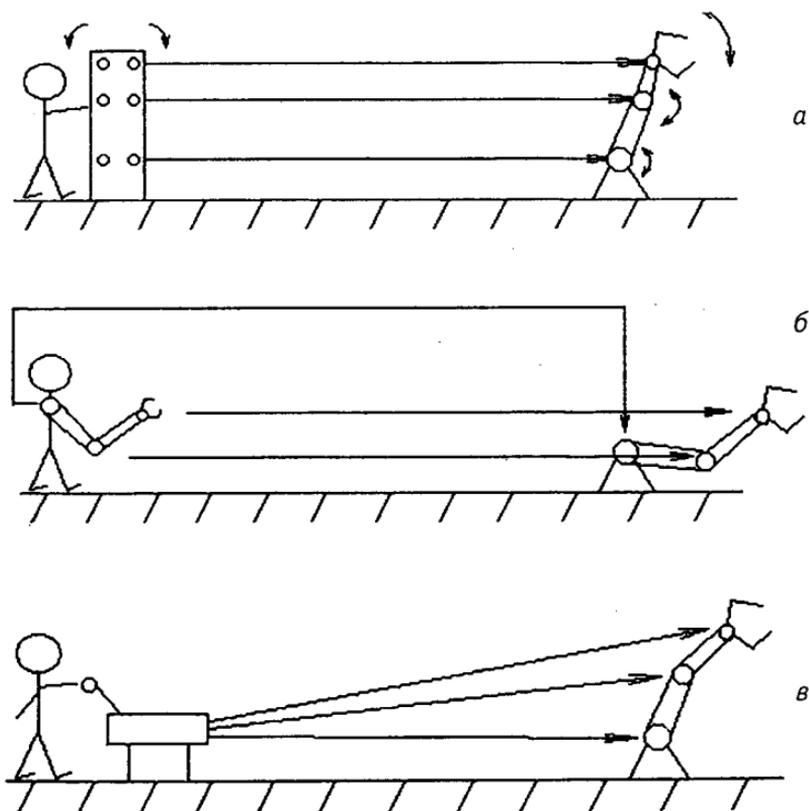


Рис. 2.5. Способы человеко-машинного управления манипулятором с полным включением оператора в рабочий цикл: *а* — командный; *б* — копирующий; *в* — полуавтоматический

эффективность такого управления, поскольку скорость и ускорение перемещения звеньев задающего устройства оператором не зависели от изменения реальных нагрузок в звеньях манипулятора. Потребовалась обратная передача информации о величине нагрузки в каждом звене манипулятора на задающее устройство оператора. Для этого в шарнирах манипулятора уста-

новили датчики усилий (2), сигналы которых через преобразователь (3) стали передавать на силовые нагрузатели (1) в задающем устройстве (рис. 2.6).

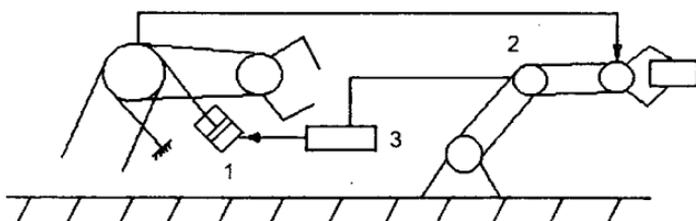


Рис. 2.6. Схема копирующего управления двустороннего действия: 1 — силовой нагрузатель; 2 — датчик усилий; 3 — преобразователь

При увеличении сигнала с датчика усилий увеличивается сила трения в силовом нагрузателе, что создает у оператора ощущение повышения нагрузки на звене манипулятора. Такие системы назвали двусторонними системами копирующего управления. Передача нагрузок на задающий орган позволила оператору точнее управлять манипулятором. Манипуляторы с копирующим управлением применяют при выполнении сложных операций в атомной энергетике, обезвреживании боеприпасов, работе с опасными бактериологическими и химическими веществами.

При полуавтоматическом управлении оператор задает движение звеньев манипулятора с помощью управляющей рукоятки со многими степенями подвижности (рис. 2.5, в). Число степеней подвижности управляющей рукоятки равно числу степеней подвижности манипулятора. В зависимости от направления и угла поворота управляющей рукоятки вычислительное устройство формирует команды управления приводами звеньев манипулятора.

Различают способы полуавтоматического управления по вектору скорости, по вектору усилий и по положению. Чаще всего применяют управление по *вектору скорости*, при котором оператор задает шестистепенной рукояткой направление и величину перемещения звена манипулятора, а вычислительное устройство рассчитывает команды управления приводами. При управлении по *вектору усилий* вычислительное устройство формирует команды, пропорциональные усилиям, развиваемым оператором на управляющей рукоятке. Эти усилия измеряют датчиками, встроенными в рукоятку. Управление по *вектору положения* заключается в том, что оператор, перемещая управляющую рукоятку, задает траекторию движения рабочего органа манипулятора, а вычислительное устройство вырабатывает сигналы управления приводами звеньев. Для сложных операций применяют комбинацию этих способов: по вектору скорости — при движении захватного устройства; по вектору усилий — при захвате объекта и контакте с другими объектами; по вектору положения — при сборке.

Рассмотренные способы человеко-машинного управления требуют участия человека в каждом рабочем цикле, что приводит к ограничению скорости операций психофизиологическими возможностями оператора. Разгрузка оператора путем передачи части его функций системе автоматического управления предусмотрена в интерактивных системах человеко-машинного управления.

В автоматизированных интерактивных системах рабочий цикл манипулятора делят на две части: операции дистанционного и автоматического управления. К первым относят операции в неорганизованной среде, где требуется распознавать непредвиденные ситуации с помощью оператора. Ко вторым относят операции в организованной среде, которые могут выполняться автоматически. Оператор управляет манипулятором

в неорганизованной среде, а выполнение остальных операций передает автоматическому устройству.

В супервизорных интерактивных системах оператор оценивает ситуацию в рабочей зоне и подает в устройство управления обобщенные команды типа «взять деталь А в точке В с обходом препятствия С». Эта команда разбивается на операции, которые выполняются автоматически.

В диалоговых интерактивных системах оператор взаимодействует с компьютером с помощью человеко-машинного интерфейса. В режиме диалога компьютер вырабатывает программы действий манипулятора, а оператор выбирает из них наилучшую программу, например, траекторию перемещения рабочего органа по критерию минимума энергии или времени.

При человеко-машинном управлении необходимо создать как информационный (от манипулятора к оператору), так и управляющий (от оператора к манипулятору) каналы. Информационный канал, как правило, визуальный, играет роль обратной связи о поведении дистанционно управляемого манипулятора. Характеристики человеко-машинных систем управления определяются психофизиологическими свойствами оператора. Отсюда вытекают требования к человеко-машинным системам:

- предоставление оператору полной информации о действиях манипулятора;
- соответствие характеристик управляющих устройств свойствам человека-оператора;
- рациональное распределение функций между оператором и машиной.

Для первой задачи определим границы прямой видимости рабочего органа при удалении робота от оператора [10]. Манипулятор 1 длиной r оснащен захватным устройством 2 с межпальцевым расстоянием d и поворачивается на корпусе 3 движущегося робота в плоскости его перемещения (рис. 2.7).

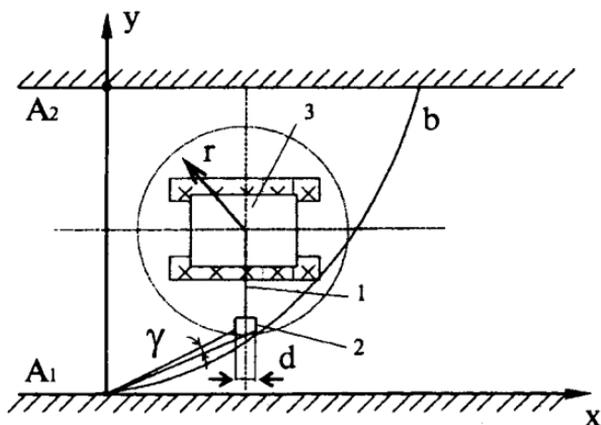


Рис. 2.7. Схема наблюдения захватного устройства:
 b — граница видимости для оператора,
 находящегося в точке A_1

Технологические операции сводятся к захвату объекта манипулирования захватным устройством. Для этого оператор, перемещаясь по линии A_1A_2 , должен распознать положение и состояние захватного устройства в зоне обслуживания. Очевидно, для наилучших точек наблюдения A_1 и A_2 , при определенных уровнях освещенности и контрастности существует минимальный угол зрения оператора γ :

$$\gamma = \arctg \frac{y}{x-d} - \arctg \frac{y}{x} = \arctg \frac{yd}{x(x-d) + y^2}.$$

Если γ уменьшается, оператор теряет возможность распознавания состояния захватного устройства. Для обеспечения обзора, по мере удаления робота от оператора, угол наблюдения должен быть больше γ . Это возможно за счет смещения захватного устройства к стороне, противоположной оператору. Смещение, при

котором поддерживается минимальный угол зрения γ , в процессе удаления робота на расстояние x , задает границу видимости b из точки A_1 . Эта граница описывается уравнением окружности:

$$y^2 + x^2 - dx - \frac{d}{\operatorname{tg}\gamma} y = 0$$

с центром в точке $x_0 = \frac{d}{2}$, $y_0 = \frac{d}{2\operatorname{tg}\gamma}$

и радиусом $r = \frac{d}{2\sin\gamma}$.

Для нормированной оценки обзорности рабочего органа при дистанционном управлении введем коэффициент обзора:

$$K_0 = \frac{S_p - S_h}{S_p},$$

где S_p — площадь рабочей зоны или зоны, где может находиться рабочий орган; S_h — площадь зоны невидимости рабочего органа в плоскости его перемещения.

При невозможности прямой видимости в рабочей зоне или на борту робота устанавливаются телекамеры. Карты обзорности захватного устройства для нескольких вариантов размещения телекамер на борту робота построены на рис. 2.8.

Наилучшую обзорность обеспечивает размещение одной телекамеры в углу корпуса робота, а другой — на локтевом звене манипулятора (рис. 2.8, в).

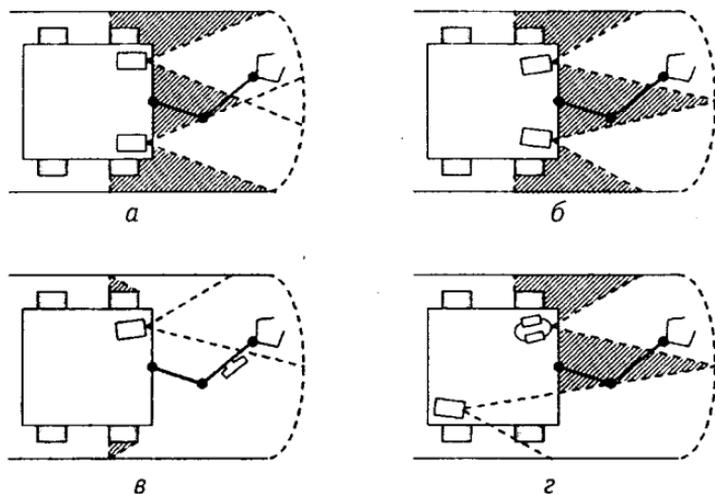


Рис. 2.8. Карты обзорности при перемещении телекамер на борту робота: *а* — на краях корпуса параллельно продольной оси ; *б* — на краях корпуса под углом к продольной оси; *в* — в углу корпуса и на последнем звене манипулятора; *г* — на противоположных углах корпуса

Для передачи сигналов на движущийся робот перспективны оптические каналы связи: по волоконно-оптической линии или непосредственно по воздуху. Волоконно-оптическая линия связи (рис. 2.9) представляет собой оптическое волокно (1), к началу которого через модулятор и преобразователь «электричество — свет» (2) подключен передатчик. Конец волокна через преобразователь «свет — электричество» (3) и демодулятор соединен с приемником.

Оптическое волокно содержит сердцевину (1), оболочку (2) и внешнее покрытие (3) (рис. 2.10).

Ядро и оболочка выполнены из кварцевого стекла, причем показатель преломления у оболочки выше, чем у сердцевины. Оптический луч, введенный в сердцевину, проходит большие расстояния, многократно отражаясь от границы сердцевины и оболочки. Диаметр

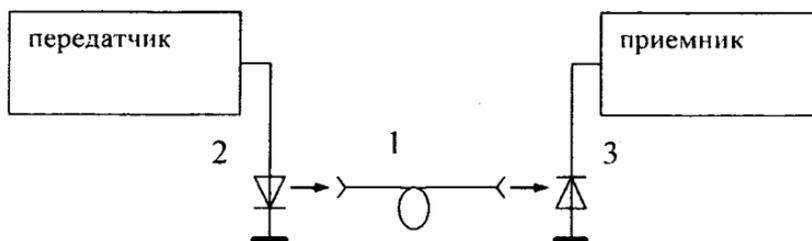


Рис. 2.9. Схема волоконно-оптической линии связи:

- 1 — оптическое волокно;
- 2 — преобразователь «электричество-свет» ;
- 3 — преобразователь «свет-электричество»

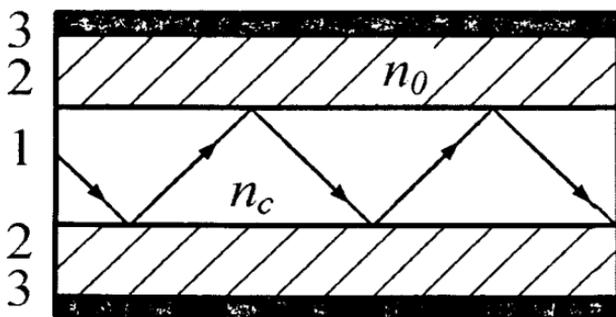


Рис. 2.10. Передача команд по оптическому волокну:
1 — сердцевина; 2 — оболочка; 3 — внешнее покрытие

оптического волокна без покрытия составляет около 1мм, радиус изгиба до излома — 5–10 мм.

В качестве передатчика световых импульсов применяют лазер или лазерный диод на арсениде галлия. Оптические сигналы принимаются фотодиодом. Толщина оптического волокна не превышает одного миллиметра, поэтому приходится покрывать его защитной оболочкой и объединять несколько волокон в оптический кабель с прочной сердцевиной и оболочкой,

устойчивой к механическим воздействиям. Волоконно-оптические кабели намного легче медных, могут изгибаться, искровзрывобезопасны, дешевы, не подвержены электромагнитным помехам. Они отличаются малыми потерями сигнала и чрезвычайно высокой пропускной способностью. Вместе с тем, для соединения двух отрезков оптического волокна необходим высокоточный оптический разъем.

Передача оптических сигналов невидимого (инфракрасного) диапазона через атмосферу применяется при управлении роботом из безопасного места на расстоянии прямой видимости (до 30–40 м). Дальность связи на длине волны 0,96 мкм при мощности передатчика 10 МВт и угле направленности излучателя 6° составляет около 200 м.

Канал дистанционного управления роботом в инфракрасном диапазоне (рис. 2.11) содержит передатчик электрических сигналов (1), преобразователь сигналов в частоту импульсов (2), лазерный излучающий диод (3), фокусирующую линзу (4), фотодиод (5) с блендой (6) для защиты от пыли и боковой засветки, преобразователь частоты в сигнал (7).

Передача команд возможна при отсутствии непрозрачных предметов на линии связи оператора с роботом.

2.3. СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Различают цикловые, позиционные и контурные системы программного управления перемещением звеньев манипулятора (рис. 2.12).

Для погрузочно-разгрузочных роботов, обслуживающих технологическое оборудование, чаще всего применяют цикловые системы, обеспечивающие движение звеньев манипулятора по каждой степени подвижности от одного упора до другого. Упор представляет собой механический элемент, ограничивающий дви-

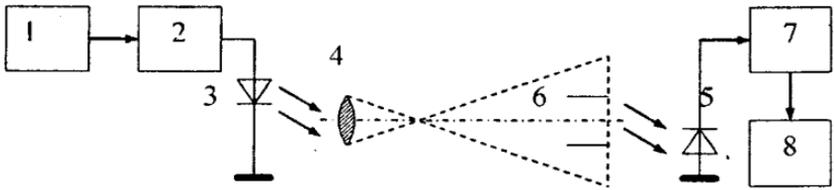


Рис. 2.11. Передача команд по инфракрасному каналу: 1 — передатчик; 2 — преобразователь сигнала в частоту оптических импульсов; 3 — светодиод; 4 — линза; 5 — фотодиод; 6 — бленда; 7 — преобразователь оптических импульсов в частоту; 8 — приемник

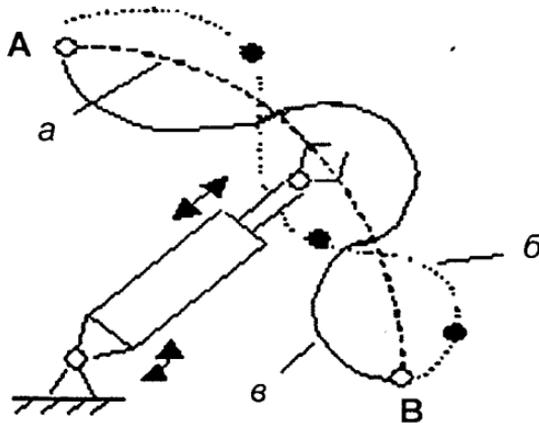


Рис. 2.12. Цикловое (а), позиционное (б), и контурное (в) управление движением звена манипулятора между точками А и В

жение звена. Упорами фиксируют только начальную и конечную точки движения звена. Такое управление хорошо совмещается с двухпозиционным пневмоприводом перемещения звена и применяется для загрузки и разгрузки единиц оборудования.

Система циклового управления осуществляет запрограммированную последовательность движений звеньев, остановки с заданными выдержками времени в начальной и конечной точках, выдачу команд управления единицей оборудования, управление захватным устройством. Система работает в режимах обучения, ручного управления и автоматической работы.

Процесс обучения заключается в перестановке упоров для изменения позиционирования звеньев и записи последовательности смены положений звеньев в программноносителе системы управления. Программа управления вводится в виде последовательности кадров. **Кадром** называют группу шагов программы, соответствующую законченной последовательности операций, например, перемещению рабочего органа в заданную точку при работе нескольких степеней подвижности. При автоматической работе кадры последовательно считываются из программноносителя и переносятся в управляюще-вычислительный модуль, формирующий команды управления для блока сопряжения с роботом и технологическим оборудованием.

При позиционном управлении обеспечивается движение звена манипулятора через заданные точки между начальной и конечной позициями. Управление движением звена между соседними точками не осуществляется. Для управления необходимы расчет и последовательная выдача команд для прохождения звена через заданные точки программной траектории $q(t)$ в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n и проверке соответствия фактического и заданного положений звеньев. Расчет программной траектории сводится к определению продолжительности T управления и ее разбиению на отрезки, затем формируют управление для каждого отрезка.

Управляющая программа содержит информацию о последовательности шагов, положении звеньев и времени выполнения шагов программы. Применяют последовательное, бескоординатное и терминально-коор-

динатное управление перемещением звеньев через заданные точки.

При последовательном управлении движется одно звено, а другие остаются неподвижными. При бескоординатном управлении все звенья движутся по своим траекториям одновременно. При терминально-координатном управлении звенья начинают и прекращают движение одновременно. Роботы с позиционным управлением движением звеньев применяют при точечной сварке, когда в заданных точках перемещения рабочего органа надо закрыть сварочные клещи и пропустить через них электрический разряд.

В контурных системах управления осуществляют непрерывное управление движением манипулятора по заданной траектории между начальной и конечной позициями.

Системы строят *двумя способами*. Первый способ основан на записи движений по каждой степени подвижности в виде непрерывных траекторий, второй — на записи конечного числа опорных точек траектории и расчете непрерывной траектории между смежными точками методом интерполяции. Чаще применяют второй способ, не требующий большого объема памяти и позволяющий реализовать в одном устройстве как контурное, так и позиционное управление. Роботы с контурным управлением имеют привод, следящий за положением звена по каждой степени подвижности манипулятора. Такие роботы применяют, например, для нанесения покрытий на поверхность и дуговой сварки.

Роботы с программным управлением могут работать в среде, не меняющейся во времени. Для организации такой среды создают специальную технологическую оснастку — позиционеры, ориентаторы, накопители и другие специализированные приспособления, стоимость которых сопоставима со стоимостью робота. Даже небольшие отклонения от заданных условий, такие как изменение положения детали, поступление детали раз-

ных размеров, износ инструмента, изменение характеристик приводов, нарушают выполнение рабочего цикла. Адаптация к изменениям среды может быть обеспечена путем соответствующего изменения структуры, параметров и алгоритмов управления роботом.

2.4. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Адаптация обеспечивается путем постоянного контроля среды и состояния объекта управления с количественной оценкой качества управления процессом и изменения управления при отклонении показателя качества от заданного уровня. В процессе адаптации взаимодействуют устройство управления УУ, объект управления и среда. Возможны три способа адаптации управления к изменениям среды (рис. 2.13).

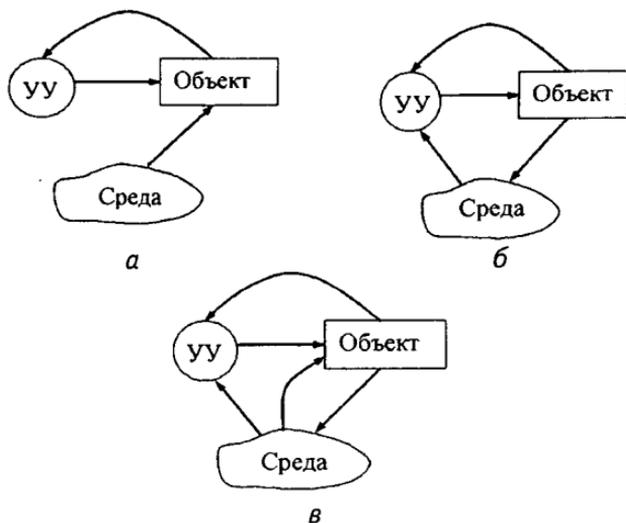


Рис. 2.13. Уровни адаптации управляющего устройства УУ:
 а — подстройка к среде через объект; б — подстройка к объекту и среде; в — достижение заданного качества управления при изменении объекта и среды

1. Изменение работы управляющего устройства УУ при изменении состояния объекта под воздействием среды (а). Примером является адаптация управления к изменению вязкости рабочей жидкости гидроприводов подводного робота, зависящей от температуры воды.

2. Изменение работы управляющего устройства УУ при изменении состояния среды под влиянием действий объекта (б). Примером является коррекция траектории движения электрода сварочного робота по положению линии стыка свариваемых изделий.

3. Изменение работы управляющего устройства УУ с целью достижения заданного качества управления при взаимных изменениях объекта и среды (в). Это может быть изменение скорости вращения абразивного круга и усилия нажатия в зависимости от формы обрабатываемого изделия и сопротивления материала при абразивной зачистке изделия роботом.

Адаптация управления роботом требует создания системы датчиков состояния среды и робота, алгоритмов обработки информации от датчиков и синтеза системы адаптивного управления. Состояние среды и робота контролируют датчиками положения, измерителями перемещений, тактильными и силовомоментными датчиками, локационными датчиками, системами технического зрения.

Для обработки больших объемов информации, переданной от датчиков, применяют интегральные и структурные методы распознавания образов.

Интегральные методы сводятся к анализу вектора интегральных признаков, полученных с помощью арифметико-логических преобразований вида:

$$Y = f \cdot [P_{nm}], (n, m) \in S,$$

где f — арифметико-логическая функция, определенная на множестве траекторий последовательного просмотра объекта; P_{nm} — элемент матрицы сканирования; S — множество точек образа объекта. Для каж-

дой линии сканирования (последовательного просмотра) i -го объекта:

$$\sum_{(n,m) \in S} P_{nm}^i R_{nm}(k) = f^i(k), k \in K, i = \overline{1, I},$$

где $\{P_{nm}^i\}$ — образ объекта; $f^i(k)$ — k -й интегральный признак объекта; k — множество линий сканирования $R_{nm}(k)$, I — множество объектов. Каждому объекту ставится в соответствие $K \geq 1$ чисел. Применяя к неизвестному объекту выбранное при обучении преобразование, получим вектор:

$$f = \{f(k), k \in K\}.$$

Распознавание этого объекта ведется по критерию

$$i: [f - f^i] = \min [f - f^i].$$

Структурные методы используют топологические особенности объектов, представленные структурными признаками, такими как число отверстий, площадь, периметр объекта.

В качестве примера приведем адаптивное управление роботом для съема плоских деталей с подвесного конвейера и их укладки в тару (рис. 2.14).

Если бы деталь была зафиксирована в некоторой точке пространства, то можно было бы задать координаты этой точки, навести на нее захватное устройство робота, захватить деталь и перенести ее в тару. Однако в реальном производстве координаты детали меняются, поскольку в процессе движения она раскачивается на подвеске. Другим решением может быть временная фиксация детали в определенной точке, на которую наводится захватное устройство. Этому мешает произвольная ориентация детали на подвеске.

Задача решается путем адаптивного управления роботом. По сигналу датчика прохождения детали через

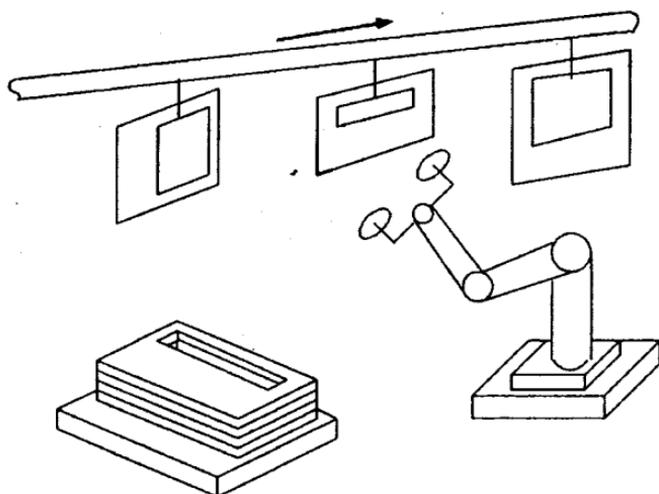


Рис. 2.14. Адаптивный робот для съема и укладки деталей

определенную точку система технического зрения определяет положение детали в пространстве и формирует команду наведения захватного устройства на деталь. В зависимости от ориентации детали захватное устройство поворачивается вокруг оси и снимает деталь с конвейера. Затем захватное устройство возвращается в заданное положение, и робот укладывает детали друг на друга. Таким образом, распознавание положения детали и соответствующее изменение алгоритма управления роботом позволяют адаптироваться к изменению положения детали.

2.5. РОБОТЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Под элементами искусственного интеллекта понимается попытка воспроизвести техническими средствами процессы принятия решений человеком в неорганизованной среде. Эта задача исключительно сложна, а ус-

пехи в ее решении пока скромны [11]. В роботах третьего поколения вместо выбора одного из имеющихся алгоритмов, как в адаптивных роботах, шаг за шагом строят модель незнакомой среды, в которой функционирует робот. Для этой модели составляют план действий робота. Таким образом, основными задачами управления с элементами искусственного интеллекта являются распознавание неизвестных объектов путем их отнесения к тому или иному классу ранее показанных объектов с последующим планированием действий робота.

Пусть все возможные объекты распознавания, например, люди, образуют множество S (рис. 2.15). Ясно, что показать всех людей, живущих на Земле, невозможно. Роботу показывают так называемую обучающую выборку S_1 — ограниченный набор людей из множества S (рис. 2.15, а).

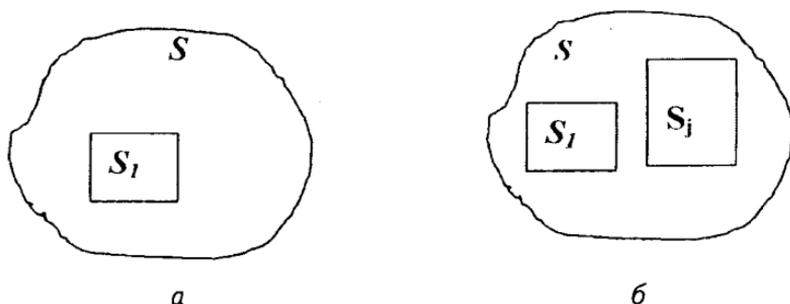


Рис. 2.15. Проблема распознавания для робота с элементами искусственного интеллекта: а — один класс объектов распознавания; б — более одного класса объектов распознавания

Путем обобщения элементов обучающей выборки система интеллектуального управления должна выработать знания, позволяющие распознавать неизвестные элементы из множества S . Задача усложняется, если предстоит распознавать более одного класса объектов (рис. 2.15, б).

Необходимые для распознавания знания вырабатываются путем взаимодействия базы данных (БД), в которую поступают описания конкретных объектов, и базы знаний (БЗ), в которой вырабатываются обобщенные описания объектов (рис. 2.16).

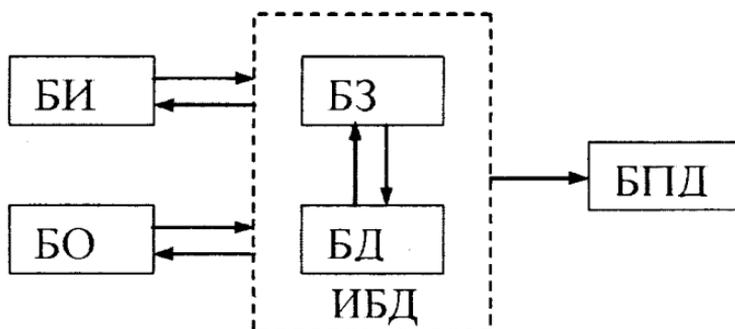


Рис. 2.16. Структура системы интеллектуального управления

Базу знаний (БЗ) и базу данных (БД) объединяют в интеллектуальную базу данных (ИБД). Например, путем обработки текущей информации из базы данных база знаний вырабатывает обобщенное описание человека как движущегося объекта, имеющего голову на туловище, связанные с туловищем две руки, и стоящего на двух ногах. Если человек имеет одну руку, то система управления не сможет распознать его как человека. Обучающую выборку вводят с помощью блока обучения (БО). Затем блок обучения отключают. Система получает реальную информацию от блока информации (БИ). Если эта информация уже содержалась в обучающей выборке, то объект распознается безошибочно. Если же эта информация не содержалась в обучающей выборке, то описание объекта передается в базу знаний, которая сопоставляет его с обобщенными описаниями и делает вывод о его принадлежности некоторому обобщенному описанию. Конечно, су-

ществуем некоторая вероятность ошибочного распознавания, зависящая от объема обучающей выборки и правил распознавания, заложенных в базу знаний. Блок планирования действий (БПД) вырабатывает и сравнивает между собой программы действий интеллектуального робота.

Таким образом, основной частью системы управления интеллектуальным роботом является система представления знаний (СПЗ) о среде функционирования робота. Различают центральную (ЦСПЗ) и частные (ЧСПЗ) системы представления знаний (рис. 2.16).

Частные системы представления знаний ЧСПЗ поставляют знания о зрительном, акустическом, тактильном и других мирах, окружающих робота. На входе частной системы физическая величина преобразуется в электрическую для выработки знаний о мире. Например, в зрительной системе представления знаний формируются геометрические представления объектов мира. Одновременно акустическая система представления знаний формирует звуковые представления объектов мира. Разные стороны объектов мира через согласующие преобразователи поступают в центральную систему представления знаний (ЦСПЗ). Выработанные ею решения разделяются на команды управления приводами рук, ног, туловища и других механических органов робота.

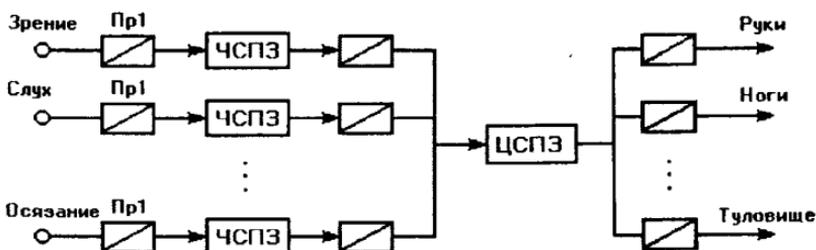


Рис. 2.17. Структура интеллектуального управления

В системе представления знаний должна быть задана предметная область (ПО), описывающая внешний мир и правила взаимодействия его объектов. Для этого вводят пространство состояний — характеристики, описывающие каждое состояние, и правила перехода из одного состояния в другое. Например, для игры в шашки задают адреса полей на доске, исходное размещение шашек и правила их перемещения от одного поля к другому. Распространенным способом представления пространства состояний является граф, вершины которого соответствуют состояниям, а дуги — операциям перехода из одного состояния в другое (рис. 2.18).

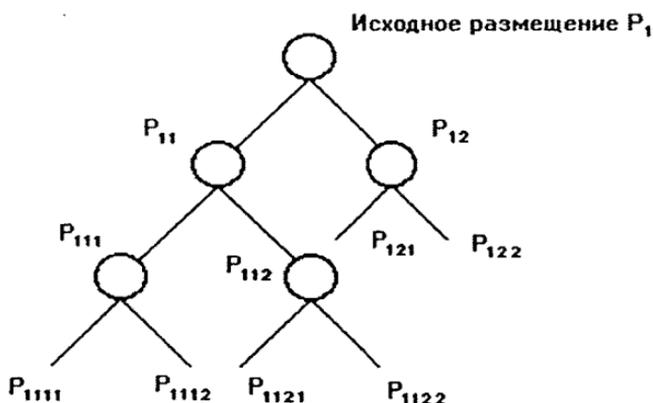


Рис. 2.18. Представление пространства состояний в виде графа

Вторым элементом системы представления знаний является пространство поиска решений. Оно может быть описано графом И-ИЛИ (рис. 2.19). Одна из конечных вершин графа соответствует достижению заданной цели.

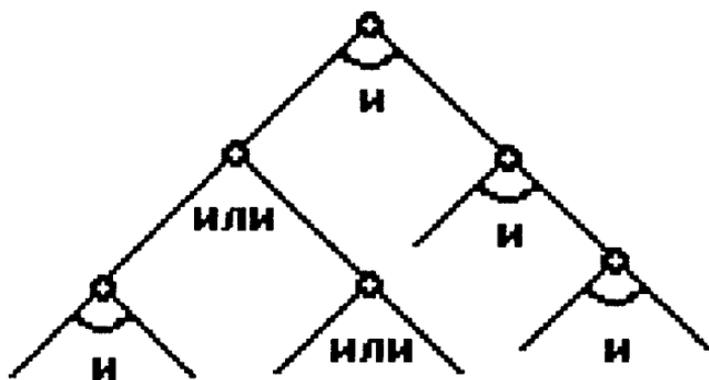


Рис. 2.19. Пространство поиска решений в виде графа И-ИЛИ

Такой граф используют при поиске решения методом сведения задачи к подзадачам. Идея метода состоит в том, что исходную задачу разбивают на более простые подзадачи до тех пор, пока на конечных вершинах не появятся подзадачи с очевидными решениями. Пусть робот P , находящийся в точке r , должен поставить объект A на объект C (рис. 2.20, *a*) [12].

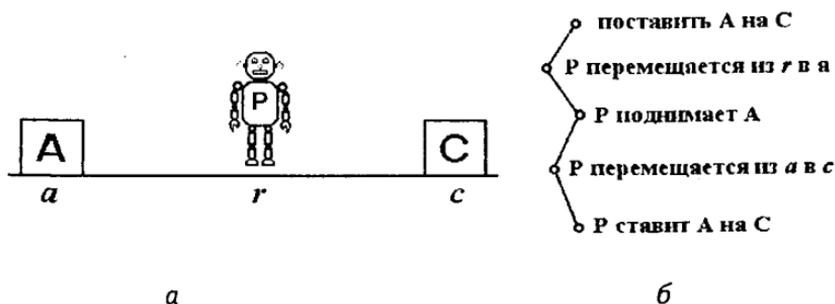


Рис. 2.20. Сведение задачи к подзадачам: *a* — исходное состояние; *б* — разбиение задачи на подзадачи

Задачу преобразуют в последовательность из четырех подзадач (рис. 2.20, б): переместиться из r в a ; поднять A ; переместиться из a в c ; поставить A на C . Затем решают каждую из простых подзадач.

Существуют четыре типа знаний:

- **морфологические**, характеризующие наличие элементов описания в имеющемся словаре;
- **синтаксические**, характеризующие структуру объекта или явления независимо от смысла и содержания используемых понятий;
- **семантические**, характеризующие значение и смысл объекта или явления;
- **прагматические**, описывающие объекты или явления с позиции решаемой задачи.

Выделим эти типы знаний во фразе «Мальчик едет на ослике». Морфологические знания показывают, что в словаре содержится каждое слово фразы. Так, слова на русском языке не распознаются системой данных для английского языка. Синтаксические знания показывают, что в данной фразе есть подлежащее, сказуемое и второстепенный член предложения. На уровне синтаксических знаний данная фраза эквивалентна фразе «Ослик едет на мальчике», также имеющей подлежащее, сказуемое и второстепенный член предложения. Семантические знания выделяют смысл объекта. На этом уровне фразу «Ослик едет на мальчике» отбрасывают, как не имеющую смысла. Прагматические знания показывают, нужны ли сведения об объекте для решения поставленной перед роботом задачи. Если робот движется в некотором направлении, то к прагматическим знаниям относится знание: находятся ли ослик с мальчиком на пути робота?

Перед обучением в интеллектуальную систему управления роботом вводят предварительные знания:

- абстрактные знания — сведения о постоянных закономерностях внешнего и внутреннего мира, например, физические законы;

— знания о целях — информация об общей цели, которую должен достичь робот, и ее разделении на частные цели;

— модель мира робота — предварительные знания о среде, где будет функционировать робот;

— накопление знаний — правила получения новых знаний, их проверки на непротиворечивость известным знаниям и включения новых знаний в модель среды.

Набор знаний представляют с помощью логических или сетевых моделей. К классу логических моделей принадлежат предикаты. Одноместный предикат $F(a)$ принимает значения 0 или 1 в зависимости от величины предметной переменной a , заданной словесным выражением:

$$F(a) = \begin{cases} 1, & a \geq a_1 \\ 0, & a < a_1 \end{cases}$$

Это выражение соответствует графику на рис. 2.21, отображающему связь двух значений предиката $F(a)$ с непрерывной переменной a .

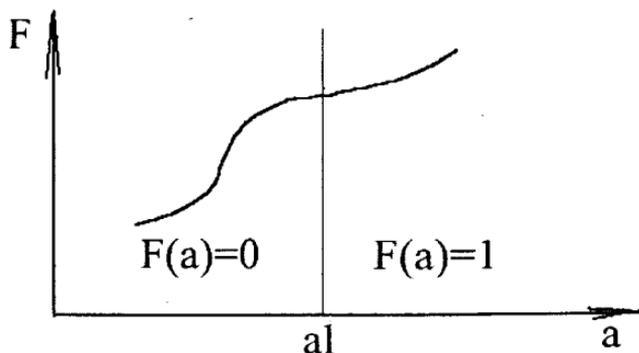


Рис. 2.21. Связь значений одноместного предиката F с непрерывной переменной a

Таким образом, обобщение знаний достигается путем сведения множества значений переменной к одному из двух значений предиката. Например, непрерывно изменяемую температуру нагреваемой воды можно представить двухместным предикатом.

Набором предикатов можно представить достаточно широкий объем знаний о предметной области в виде некоторой логической функции. Так, знания для распознавания человека могут быть представлены логической функцией:

$$Y = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5,$$

где признаки человека представлены предикатами:

$$\begin{aligned} \text{высота } a_1 &= \begin{cases} 1, \text{ если больше ширины} \\ 0, \text{ если меньше или равно ширине} \end{cases} \\ \text{число рук } a_2 &= \begin{cases} 1, \text{ если две} \\ 0, \text{ если больше или меньше двух} \end{cases} \\ \text{число ног } a_3 &= \begin{cases} 1, \text{ если две} \\ 0, \text{ если больше или меньше двух} \end{cases} \\ \text{температура } a_4 &= \begin{cases} 1, \text{ если } 36\text{-}37 \text{ градусов} \\ 0, \text{ если не } 36\text{-}37 \text{ градусов} \end{cases} \\ \text{голова } a_5 &= \begin{cases} 1, \text{ если одна} \\ 0, \text{ если не одна} \end{cases} \end{aligned}$$

Сетевые модели представления знаний отображают связи между распознаваемыми объектами. В них вершины графа отождествляют с некоторыми понятиями, а дуги — с отношениями между понятиями. В классе сетевых моделей часто применяют семантические сети и фреймы.

Семантическую модель строят в виде сети с вершинами, соединенными дугами. Вершины соответствуют предметам, а дуги — отношениям между предметами.

Для получения обобщенного описания объекта вводят термин «понятие». Понятие характеризуется:

- классом, к которому оно принадлежит;
- свойствами, выделяющими понятие из всех прочих понятий этого класса;
- примером данного понятия.

Так, понятие «человек» относится к классу «млекопитающие», отличается свойством мыслительной деятельности и имеет пример: «студент группы КП-21 Иванов». Это понятие может быть связано с другими понятиями: «аудитория», «общезитие», «улица», «библиотека». Понятия могут означать исходные или неизвестные величины, а дуги — формулы, преобразующие одни величины в другие.

В семантической сети физические объекты отображаются прямоугольными вершинами, отношения — дугами между фактами и объектами. Экстенциональная семантическая сеть связывает такие понятия, как «место», «агент», «объект» последовательностью отношений $F_k(K=\overline{I,P})$ типа «едет на...», «движется по...», «соединяется с...». Направленность отношений между предметами в семантической сети показывают путем отнесения каждого предмета к агенту — предмету, осуществляющему некоторое действие, или объекту — предмету, над которым осуществляют действие. Кроме этих понятий, применяют понятия «время», «место», «инструмент» и т.п. Особенностью семантической сети является описание объектов и агентов обобщенными понятиями, которые охватывают множество признаков конкретных объектов. Эти признаки вводятся в так называемые слоты (*slot* — щель) и могут меняться, в то время как структура семантической сети остается прежней.

Представим знания, содержащиеся во фразе «Мальчик едет на ослике», в виде семантической сети (рис. 2.22).

Конкретные признаки обобщенных понятий «мальчик» и «ослик» показаны на рисунке в прямоугольниках под понятиями.

Фрейм представляет собой обобщенное формализованное описание предмета, отличающееся тем, что удаление из этого описания любой части приводит к потере свойств, характеризующих предмет. На рис. 2.23 показано описание объекта «человек» в виде фрейма.

С вершинами фрейма соединены незаполненные части, в которых помещается информация о конкретных характеристиках понятия.

Кроме логических и сетевых моделей, для представления знаний используют специализированные языки обработки символьной информации и представления знаний общего назначения. *Первая группа* языков преобразует последовательности алфавитно-цифровых символов в синтаксические признаки, семантические маркеры, имена, отношения, действия, свойства. В нее входят также языки, ориентированные на поиск решения в пространстве состояний и доказательства теорем. С их помощью анализируемое выражение сопоставляют с синтаксическим образцом, чтобы определить, какую структуру оно имеет. Затем по образцу вызывают теоремы, порождающие новые знания о мире после появления нового выражения. Во *второй группе* для представления данных используют многоуровневые фреймовые структуры. При этом абстрактная модель предметной области представляется иерархически организованным множеством понятий, а модель конкретной ситуации — совокупностью взаимосвязанных экземпляров этих понятий.

В последнее время в теории искусственного интеллекта развиваются такие способы представления знаний, как экспертные системы, нейронные сети, фаззи-системы, ситуационные модели знаний.

Экспертная система представляет собой интеллектуальную программу, в которой хранятся знания, полученные от экспертов в некоторой области. Эксперт — это человек, владеющий комплексом знаний в определенной области. В своих действиях он не использует

простые правила «если А, то В», по которым может быть построена простая система логического управления. Его рассуждения взвешивают различные факторы: «если А, то В будет вероятнее, чем С, но лишь сопоставив D и E, можно точно сказать, так это или нет». Экспертная система состоит из проблемно-независимого интерпретатора знаний и проблемно-зависимой базы знаний. Интерпретатор знаний содержит систему логических выводов, управляющую шагами решения задачи, и координирующую систему, связывающую базу знаний с вырабатываемым системой решением.

Для представления неформализованных знаний экспертов в стандартной форме используют язык исчисления предикатов. Это позволяет делать новое заключение на основе двух или более утверждений с общими элементами. Например, из двух утверждений «препятствие — это объект перед роботом» и «человек — это объект» следует заключение «человек перед роботом — препятствие». Субъективные свойства человека-эксперта приводят к трудностям при формализации его знаний, учете прошлого и редко применяемого опыта, представлении неосознанных знаний. Поэтому экспертные системы часто соединяют с нейронными сетями, что позволяет использовать интерпретацию знаний в экспертных системах совместно со способностью нейронных сетей к обучению и работе с неполными данными.

Прототипом нейронной сети был перцептрон, предложенный Ф. Розенблаттом в 1958 г. Перцептрон состоит из чувствительных *S*-элементов, случайно связанных с ассоциативными *A*-элементами, которые через усилители *У* соединены с реагирующими *R*-элементами (рис. 2.24).

Выход *A*-элемента отличается от нуля, если на его входе включилось несколько *S*-элементов. Некоторая комбинация выходов *A*-элементов после их усиления распознается *R*-элементом как определенный образ.

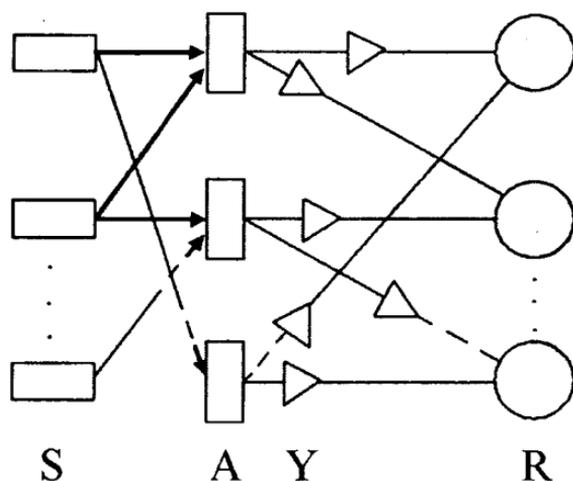


Рис. 2.24. Перцептрон Розенблатта

При обучении перцептрона S-элементы воспринимают некоторые образы, для каждого из которых известен класс R. Если для i -го образа включился элемент R_i , то «поощряют» правильное решение, увеличивая коэффициенты усиления усилителей в соответствующих связях. Если включился другой элемент, то коэффициенты усиления уменьшают до выключения R-элемента. После такого обучения перцептрон способен самостоятельно распознавать неизвестные образы с некоторой вероятностью ошибочного распознавания. Вскоре исследования показали, что перцептроны могут решать лишь ограниченный круг задач. Тем не менее их идея стала далее развиваться в нейронных сетях.

Нейронная сеть состоит из множества связанных друг с другом нейронов, имитирующих нейроны человеческого мозга. Связи между нейронами имеют разные весовые коэффициенты, которые задают в процессе обучения нейронной сети. Нейрон может быть пред-

ставлен как соединение адаптивного сумматора с нелинейным преобразователем (рис. 2.25).

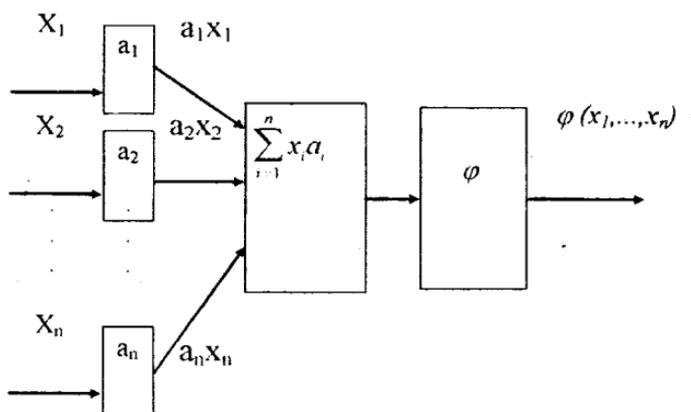


Рис. 2.25. Представление нейрона

Значения признаков среды x_1, \dots, x_n подаются к входу адаптивного сумматора через усилители с настраиваемыми коэффициентами усиления a_1, \dots, a_n . Адаптивный сумматор складывает произведения сигналов на весовые коэффициенты и передает сумму в нелинейный преобразователь φ . Нелинейный преобразователь по величине суммы определяет, к какому классу принадлежит ситуация, заданная значениями признаков x_1, \dots, x_n . Его выходной сигнал подается на входы других нейронов или к исполнительному устройству робота. Таким образом, нейронная сеть, получившая на входе множество значений признаков среды и состояния робота, после их обработки нейронами способна распознать неизвестную технологическую ситуацию по заданным весовым коэффициентам входных сигналов. Обучение нейронной сети сводится к настройке весовых коэффициентов так, чтобы определенному набору ситуаций соответствовало одно решение. Если задаются однозначные связи «ситуация—решение», то обучение организуется автоматически.

Для улучшения качества распознавания нейронные сети строят из нескольких слоев. Нейроны первого слоя получают значения признаков ситуаций и после преобразования передают результаты первичной обработки следующему слою. Каждый выходной сигнал каждого нейрона поступает на вход каждого нейрона следующего слоя. Последний слой формирует решение — к какому классу отнести данную ситуацию. Таким образом, на основе предварительного обучения системы управления, построенной в виде нейронной сети, осуществляется распознавание роботом неизвестных ситуаций.

Фаззи-системы преобразуют числа в лингвистические переменные. Для этого используют функцию принадлежности элемента x множеству M , полученную с помощью экспертов. Если $f(x) = 0$, то x не принадлежит множеству M ; если $f(x) = 1$, то x точно принадлежит M . В промежутке между 0 и 1 значение функции понимается как степень уверенности экспертов в том, что x принадлежит M . Так, понятие «близко» отображается значениями функции принадлежности $f(x)=1$ для расстояния 1,5 м, $f(x) = 0,8$ для 2,5 м, $f(x) = 0,05$ для 10 м. Это позволяет сократить число переменных для описания среды функционирования робота. При фаззи-регулировании точное значение измеряемой переменной с помощью функции принадлежности преобразуют в лингвистическое понятие, принимают соответствующее решение в виде лингвистического понятия и с помощью другой функции принадлежности преобразуют решение в точную команду.

Ситуационные модели представления знаний основаны на обобщении знаний путем наблюдений за работой оператора. Система ситуационного управления (рис. 2.26) содержит блок восприятия, анализатор, коррелятор, классификатор и экстраполятор.

На этапе обучения оператор вводит в память классификатора пары «ситуация—решение». Для этого исполь-

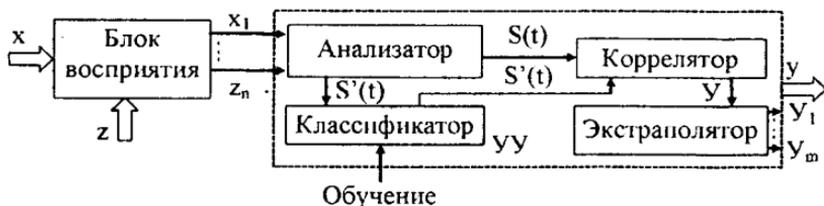


Рис. 2.26. Система ситуационного управления

зуют двухвходовую обучающую таблицу, в левой части которой записывают набор признаков, в правой — решение. Ситуация — это набор признаков, связанных пространственно-временными отношениями типа «быть одновременно», «находиться впереди» и т.п. В классификаторе формируют и хранят правила обобщения ситуаций. Обобщенные классификатором ситуации записывают в анализатор, а пары «обобщенная ситуация—команда управления» — в коррелятор. Экстраполятор выбирает оптимальное решение из нескольких вариантов, прогнозируя развитие процесса. На этапе управления блок восприятия передает в анализатор набор состояний признаков, описывающий текущую ситуацию. Если ситуация встречалась при обучении, то ее передают в коррелятор, который отыскивает соответствующую команду и через экстраполятор переключает исполнительные устройства робота. Если ситуация незнакома, она передается в классификатор, который путем последовательных обобщений относит ее к одному из классов известных ситуаций и передает в коррелятор. Основная проблема состоит в правильном обобщении множества ситуаций по классам, число которых соответствует решениям, принимаемым оператором.

Блок информации воспринимает информацию о мире с помощью системы технического очувствления или распознавания команд человека на естественном языке. Чаще всего систему технического очувствле-

ния строят на основе технического зрения. С ее помощью решают задачи распознавания образов или анализа сцен. При распознавании образов конкретное изображение объекта относят к некоторому классу объектов, отличающихся общими признаками. Затем этому изображению присваивают обобщенное название класса. Такие задачи решают при распознавании неизвестных объектов. В задаче анализа сцен определяют взаимное расположение объектов на поле наблюдения. Такие задачи часто решают при сборке изделий с помощью роботов, где сначала требуется распознать объекты, а затем собрать их в изделие.

Система восприятия должна обладать константностью — способностью выделять целостный образ объекта при изменении расстояния, ракурса или условий освещения, а также избирательностью — способностью выделять только те свойства объекта, которые необходимы для решения поставленной задачи.

Зрительное восприятие объектов реализуется по одной из следующих схем:

- обработка полного изображения объекта на некотором фоне;
- выделение структурных элементов изображения объекта и их преобразование в сеть с вершинами (элементами изображения) и дугами (отношениями между элементами);
- выделение элементов изображения по их яркости и раздельная обработка элементов.

Преобразование естественного языка человека в машинный язык осуществляют с помощью лингвистического процессора в четыре этапа (рис. 2.27).

На этапе морфологического анализа выделяют основу каждого слова и путем его сопоставления со словарем делают вывод о правильности слова, относят к соответствующей грамматической группе — существительному, глаголу, наречию и т.п. При синтаксическом анализе строят структуру предложения, в кото-

ром должно быть подлежащее, сказуемое и второстепенные члены предложения. На этапе семантического анализа происходит понимание смысла предложения по его структуре. Для этого обращаются к логической или сетевой модели знаний о среде. Имеющая смысл фраза проходит этап прагматического анализа, на ко-

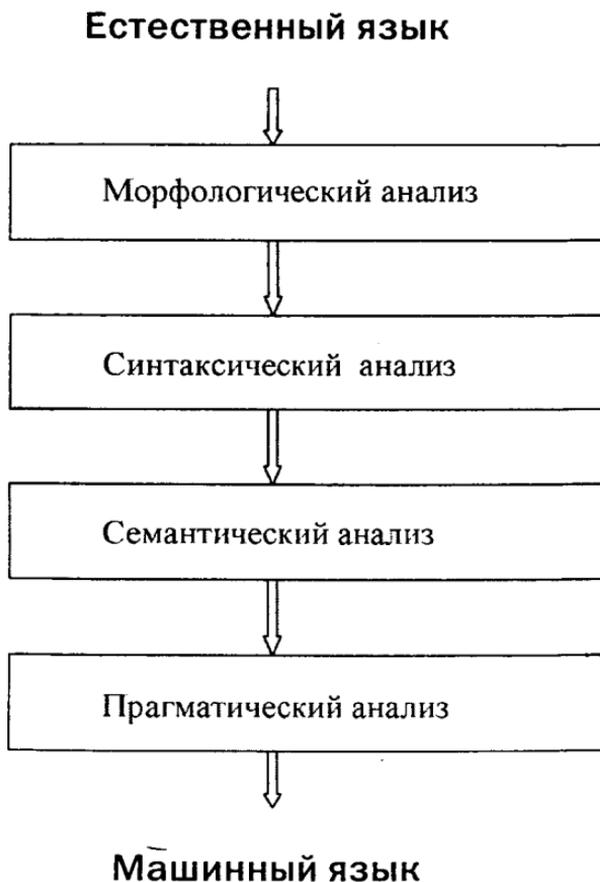


Рис. 2.27. Этапы машинного представления естественного языка

тором ее оценивают с позиции решаемой задачи. Так, фраза «Мальчик едет на ослике» оценивается, если ослик находится на пути движущегося робота и робот должен принимать решение: подать сигнал или остановиться.

Перейдем теперь к планированию действий интеллектуального робота. Цель планирования действий — выбрать последовательность действий робота, обеспечивающую кратчайший путь к достижению поставленной цели.

Например, интеллектуальный робот должен сформировать последовательность действий по сборке готового изделия из набора деталей. Исходное размещение деталей называют начальным состоянием S , готовое изделие — целевым состоянием G , а последовательность действий робота — множеством операторов F . Планирование действий робота по переходу от S к G называют представлением задачи в пространстве состояний.

Пусть на четырех площадках размещено пять кубиков «Начало S » (рис. 2.28).

Манипуляционный робот может перемещать по одному верхнему кубiku с одной площадки на другую так, чтобы кубики образовали пирамиду со словом «РОБОТ». Это будет конечной сценой G . Задача состоит в формировании последовательности действий робота, обеспечивающей переход из S в G с минимальным числом перемещений. Ее можно решить путем полного перебора всех последовательностей перемещений с выбором последовательности, обеспечивающей минимальное число перемещений. Такое решение, как в шахматной игре, быстро приведет к громадному числу вариантов, каждый из которых потребует анализа.

Выберем кратчайшую последовательность перемещений, используя алгоритм упорядоченного перебора [13]. Для этого перед выбором шага по перемещению будем оценивать перспективность каждого шага с по-

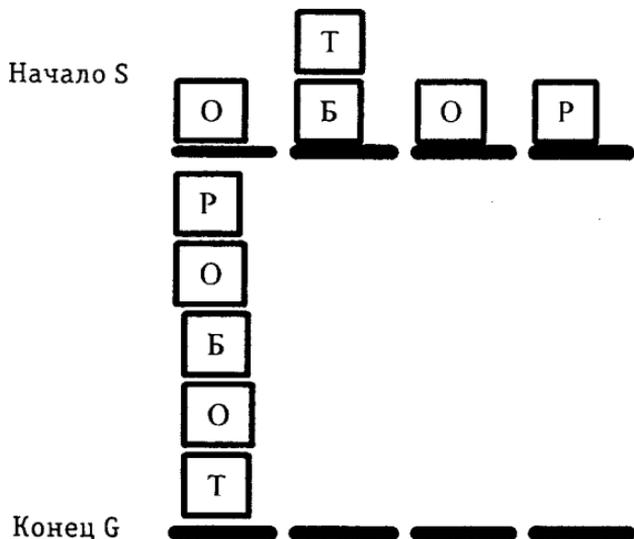


Рис. 2.28. Начальная и конечная сцены для планирования действий робота

зиции достижения конечной цели. Введем функцию оценки перспективности решения:

$$f(v) = g(v) + h(v)$$

где $g(v)$ — число шагов, пройденных от начального расположения до промежуточного расположения S. Второе слагаемое $h(v)$ — сумма чисел кубиков не на своем месте и кубиков, мешающих установке каждого из них на свое место. Поскольку оценка функции $h(v)$ исходит из соображений эксперта, ее называют *эвристической функцией*.

Сформированная последовательность действий показана на рис. 2.29.

Из начальной сцены (рис. 2.28) возможны следующие перестановки ($g=1$):

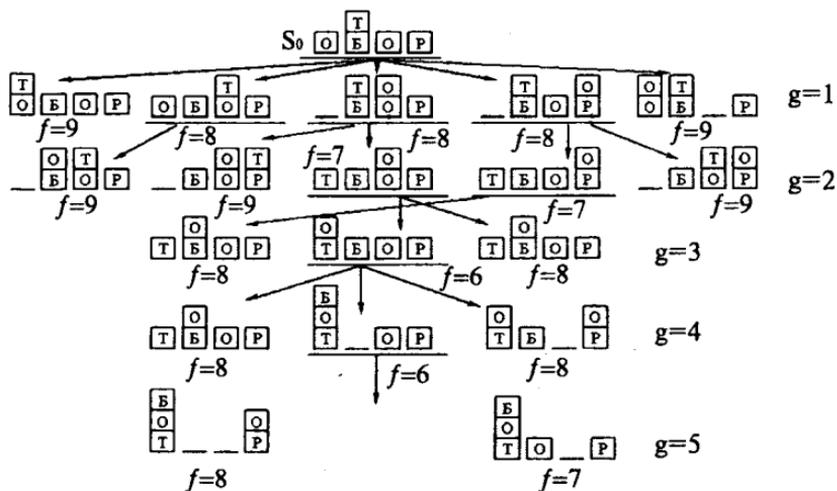


Рис. 2.29. Планирование последовательности действий робота методом упорядоченного перебора

1) $f_1 = 1+5+2+1$, т.к. не на своем месте 5 кубиков. Установке кубика Т мешают кубики О, Т, а кубику О — кубик Т.

2) $f_2 = 1+5+1+1$, т.к. не на своем месте 5 кубиков. Установке кубика Т мешает кубик О, а кубику О — кубик Т.

3) $f_3 = 1+5+1+1$, т.к. не на своем месте 5 кубиков. Установке кубика О мешает кубик О, а кубику Б — кубик Т.

Здесь наименьшее значение $f_1 = 8$ имеют сцены 2, 3, 4.

Из сцены 2 возможны сцены второго шага ($g = 2$):

4) $f_4 = 2+5+1+1$, т.к. не на своем месте 5 кубиков. Установке кубика Б мешает кубик О, а кубику О — кубик Т.

Из сцены 3 возможны сцены второго шага ($g = 2$):

5) $f_5 = 2+4+1$, т.к. не на своем месте 4 кубика. Установке кубика О мешает кубик О.

6) $f_6 = 2+5+1+1$, т.к. не на своем месте 5 кубиков. Установке кубика О мешает кубик О, а кубику Р — кубик Т.

7) $f_7 = 2+5+1$, т.к. не на своем месте 4 кубика. Установке кубика Р мешает кубик О.

Здесь наименьшее значение $f_3 = 7$ имеют сцены 2, 4.

Аналогично планируют последующие действия по перестановке кубиков.

Планирование действий робота возможно представлением задачи в виде теоремы, которую следует доказать. Задают множество известных утверждений или аксиом. Формулируют теорему, доказательство которой позволяет получить решение поставленной задачи. Затем выводят новые утверждения путем комбинации известных утверждений. После этого проверяют, не содержат ли новые утверждения сформулированную теорему. При отрицательном результате продолжают выводить новые утверждения до совпадения одного из них с ранее сформулированной теоремой.

Задачу планирования действий можно решить путем ее последовательного разбиения до тех пор, пока не появятся мелкие задачи, для которых способ решения известен. Затем решения мелких задач объединяют до решения поставленной задачи. Подзадачи могут быть связаны отношениями И, И-ИЛИ. В первом случае для решения поставленной задачи нужно решить все подзадачи. Во втором случае подзадачи разбиваются на группы, связанные отношением ИЛИ, причем внутри группы подзадачи связаны отношением И. В этом случае для решения исходной задачи достаточно решить все подзадачи любой группы.

2.6. СРЕДСТВА ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОВ

2.6.1. Классификация

Средствами очувствления называют датчики, которые вырабатывают информацию о среде функционирования и состоянии робота, достаточную для правильного распознавания технологических ситуаций и формирования команд управления. В процессе управления адаптивными и интеллектными роботами необходимо оценивать линейные и угловые перемещения звеньев друг относительно друга, нагрузки в звеньях робота, расстояние между объектом и захватным устройством, положение захватного устройства в пространстве и скорость его движения, наличие, размеры, массу, температуру, форму и цвет объектов манипулирования, а также многие другие параметры [14].

Средства очувствления делят на датчики **внешней среды** и датчики **внутреннего состояния робота**. К первым относят тактильные датчики со щупом, локационные датчики и системы технического зрения. Ко вторым относят тактильные матрицы, силомоментные датчики, измерители перемещений и датчики положения. Контактные датчики имеют механический контакт с объектом. Бесконтактные датчики не имеют механического контакта с объектом.

На рис. 2.30 показаны примеры применения средств очувствления. Оценка расстояния до верхней пластины (1) в кассете (рис. 2.30, а) осуществляется датчиком (2) касания или локационным датчиком на захватном устройстве. Наличие детали в заданной позиции (рис. 2.30, б) контролируется электромагнитным датчиком. Для совмещения центра объекта с центром датчика в заданной позиции, отмеченным крестиком рис. 2.30, в) используют электромагнитный датчик.

Для формирования изображения объекта, перемещаемого конвейером, применяют линейку фотодатчиков с источником света (рис. 2.30, г). С помощью та-

кой линейки в захватном устройстве робота (рис. 2.30, д) можно определить ориентацию простых объектов. Ориентация прямоугольных объектов распознается двумя ортогональными линейками фотодатчиков, освещаемыми ортогональными линейками источников света (рис. 2.30, е). Размеры объемной детали в ориентирующей лотке определяются фотодатчиками, встроенными в стенки лотка (рис. 2.30, ж). Форма плоского объекта распознается по состоянию фотоматрицы (рис. 2.30, з). Распознавание объемной детали осуществляется матрицей тактильных датчиков со щупами одинаковой длины (рис. 2.30, и).

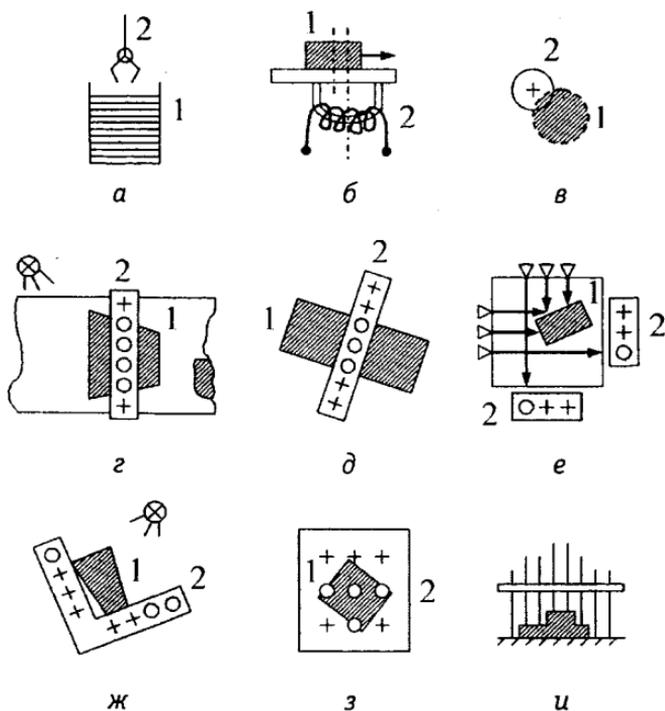


Рис. 2.30. Применение средств очувствления роботов (1 — объект, 2 — сенсор)

Оценка состояния каждого признака среды отдельным датчиком требует крупных затрат на создание информационно-системы. Возникает задача распознавания состояний n признаков среды $m < n$ датчиками стоимостью C_i . Складываются два подхода к ее решению:

- установка минимального набора доступных датчиков для части признаков среды m и получение остальных признаков $(n - m)$ путем логической обработки сигналов датчиков;

- применение многофункционального информационного датчика в виде телекамеры или широкополосного микрофона, который соединен с системой распознавания оптических или звуковых образов.

При первом подходе в обучающей выборке отыскивают устойчивые логические связи признаков и выбирают наборы признаков среды по фактору стоимости. Так, путем логической обработки аналогового сигнала датчика скорости колесно-рельсового робокара-тягача можно извлечь 11 признаков среды: скорость, направление движения, ускорение, замедление, превышение заданной скорости, сжатие и растяжение состава, сход с рельсов, буксование, отказ электродинамического торможения, счет попыток трогания с места [15]. Обычный контроль признаков потребовал бы 11 разных датчиков с соответствующим увеличением стоимости системы.

Второй подход универсален, но требует сложных алгоритмов обработки наблюдаемого образа и его сопоставления с эталоном. Для распознавания зрительного, звукового или мультисенсорного образа объекта в компьютере требуется сформировать решающие функции.

2.6.2. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ

Датчики положения или путевые переключатели фиксируют наличие подвижного объекта в зоне чувствительности датчика. Их используют для циклового и позиционного управления роботами. К контактным датчикам положения относятся концевые выключатели и секционированные троллеи. Концевой выключатель срабатывает при повороте его рычага перемещающимся объектом (рис. 2.31, а). Секционированная троллея проводит электрический ток на определенных участках перемещения объекта (рис. 2.31, б). Благодаря наглядности работы, контактные датчики просты в обслуживании, однако не могут работать при скоростях перемещений, превышающих 300 м/мин.

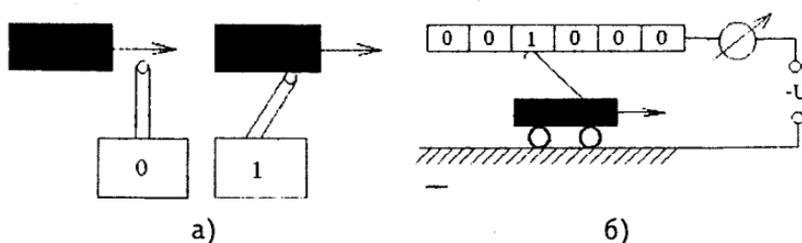


Рис. 2.31. Контактный датчик положения:

а — рычажный выключатель; б — секционированная троллея

Бесконтактные датчики положения бывают магнитогерконовыми, генераторными, индуктивными, емкостными и фотоэлектрическими. Магнитогерконовый датчик представляет собой 2–3 позолоченные металлические пластины («геркон» является сокращением слов «герметизированные контакты»), заключенные в стеклянный вакуумный баллон (рис. 2.32).

Контакты на концах пластины замыкаются, размыкаются или переключаются под действием магнитного поля при перемещении постоянного магнита. Постоянный магнит, связанный с подвижным объектом, может

перемещаться параллельно (рис. 2.32, а) или перпендикулярно (рис. 2.32, б) оси геркона. К недостаткам геркона относятся прилипание контактов, кратковременное отскакивание контактов при замыкании, чувствительность к электромагнитным помехам.

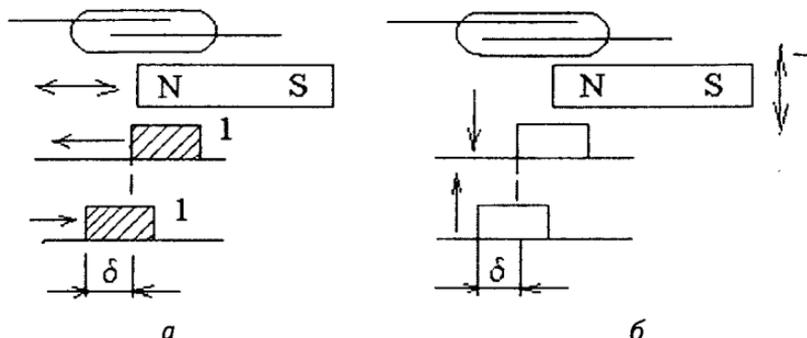


Рис. 2.32. Работа магнитогерконового датчика положения:
 а — при продольном движении магнита;
 б — при перпендикулярном движении магнита

Работа генераторного датчика положения основана на изменении индуктивности колебательного контура генератора при перемещении рядом металлического объекта. Это приводит к срыву генерации колебаний и появлению сигнала на выходе. Современные генераторные датчики положения выполнены в виде неразборного болта, который вкручивается в отверстие диаметром 8–12 мм (рис. 2.33).

Внутри болта размещены автогенератор, детектор, пороговый элемент и выходной усилитель-формирователь. Чувствительный элемент представляет собой катушку индуктивности. Прохождение металлического объекта на расстоянии 1–3 мм от торца датчика приводит к изменению индуктивности, срыву генерации и включению реле Р между проводом питания и третьим проводом датчика.

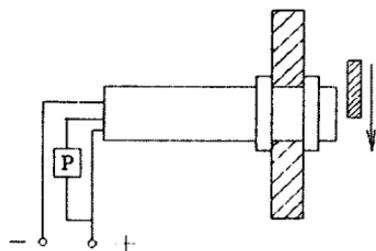


Рис. 2.33. Генераторный датчик положения типа торцевого

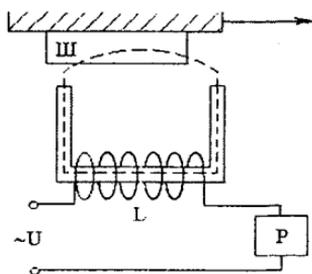


Рис. 2.34. Индуктивный датчик положения дроссельного типа

Индуктивный датчик положения использует эффект резкого уменьшения индуктивного сопротивления катушки L со стальным П-образным сердечником при перемещении мимо нее ферромагнитного шунта Ш на объекте (рис. 2.34). При этом включается реле P в цепи катушки, получавшее питание от источника переменного тока $\sim U$.

В емкостных датчиках положения чувствительным элементом является емкость колебательного контура. Перемещение объекта между двумя пластинами конденсатора приводит к срыву колебаний генератора и появлению сигнала на выходе датчика. Емкостные датчики положения высокочувствительны и просты по конструкции, однако меняют свои характеристики в зависимости от запыленности и температуры.

Принцип работы фотоэлектрических датчиков положения (фотореле) основан на изменении освещенности фотоприемника при перемещении объекта. Фотореле срабатывают при перекрытии объектом луча от источника света к фотоприемнику или при отражении объектом света от источника, попадающего на фотоприемник (рис. 2.35).

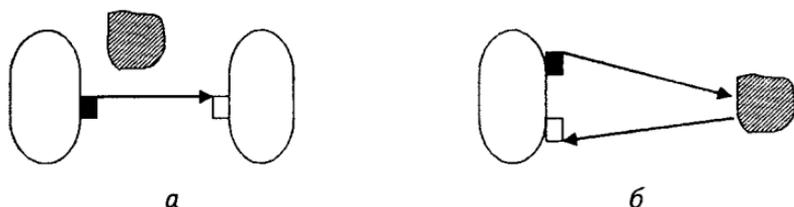


Рис. 2.35. Способы контроля положения объекта фотозлектрическим датчиком: а — перекрытие оптического зазора; б — отражение от объекта

2.6.3. ИЗМЕРИТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Измеритель перемещений измеряет линейное или угловое перемещение звена робота между начальной и конечной точками перемещения. Различают аналоговые и цифровые измерители перемещений.

В аналоговых измерителях выходная величина изменяется непрерывно, в зависимости от величины перемещения звена. Простейшим аналоговым измерителем перемещения является потенциометр, представляющий собой переменный резистор с линейной связью между перемещением движка, связанного со звеном робота, и изменением сопротивления (рис. 2.36).

При крайнем верхнем положении движка напряжение U_2 равно напряжению U_1 . При крайнем нижнем положении движка напряжение U_2 равно нулю. В промежутках между этими положениями измеряемое напряжение U_2 линейно зависит от угла α поворота звена манипулятора.

Аналоговым измерителем перемещений является вращающийся трансформатор (рис. 2.37). Если первичная и вторичная обмотки трансформатора близки и параллельны, то во вторичной обмотке наводится максимальное напряжение. По мере их удаления друг от друга напряжение во вторичной обмотке уменьшается.

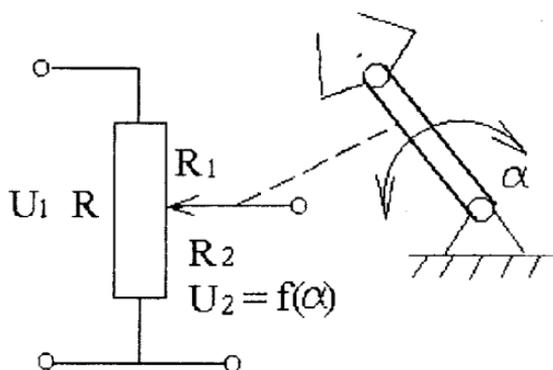


Рис. 2.36. Потенциометрический измеритель перемещений

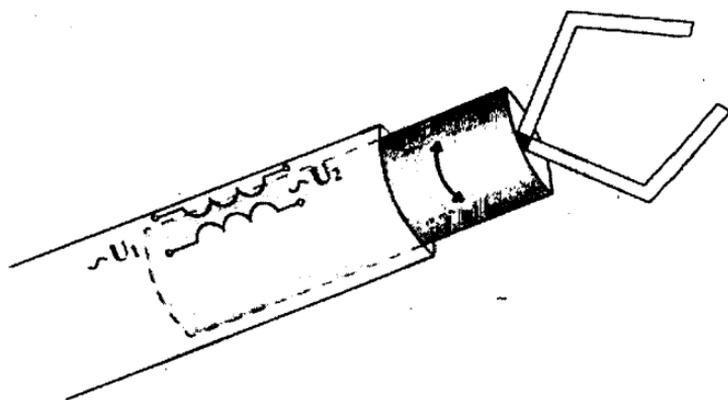


Рис. 2.37. Вращающийся трансформатор

При измерении угла поворота звена робота вращающимся трансформатором в первичную обмотку подают переменное напряжение U_1 . Вторичную обмотку соединяют со звеном робота и при повороте звена измеряют напряжение U_2 , наводимое в ней от первичной обмотки.

Цифровые измерители перемещений преобразуют линейное или угловое перемещение в цифровой код. Они точнее аналоговых измерителей, поскольку разрешающая способность кодирования перемещений весьма высока. Измерители имеют кодирующий диск или полосу, соединенные со звеном робота. Чаще всего для измерения поворота одного звена робота относительно другого применяют фотоэлектрический измеритель перемещений, встроенный в соединение звеньев (рис. 2.38).

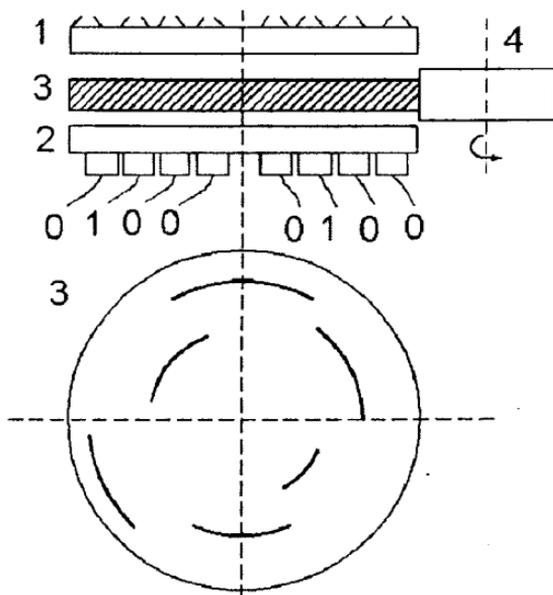


Рис. 2.38. Фотоэлектрический измеритель угловых перемещений: 1 — диск светодиодов; 2 — диск фотодиодов; 3 — кодирующий диск; 4 — объект

Измеритель состоит из дисков с источниками (1) и приемниками (2) света, закрепленных на общей оси так, что каждый приемник (фотодиод) получает свет от расположенного напротив источника (светодиода).

Между этими дисками размещен непрозрачный кодирующий диск (3), в котором вырезаны сектора. При повороте этого диска объектом (4) одни фотодиоды воспринимают свет, а другие — нет. Соответственно углу поворота изменяется код на выходе датчика. В зависимости от числа фотодиодов и размещения вырезанных секторов число кодовых комбинаций на один оборот диска составляет нескольких тысяч, а разрешающая способность датчика достигает доли микрона.

В качестве датчиков скорости раньше применяли тахогенераторы — миниатюрные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, в которых выходное напряжение изменялось пропорционально угловой скорости вращения ротора. Оказалось, что измерять скорость можно точнее и дешевле с помощью бесконтактного датчика положения, в зазоре которого перемещаются зубцы рейки или колеса, соединенных с перемещающимся объектом (рис. 2.39).

При прохождении зубца через чувствительную зону датчика он срабатывает и выдает импульс в счетчик импульсов СИ. Число импульсов в единицу времени показывает скорость перемещения объекта.

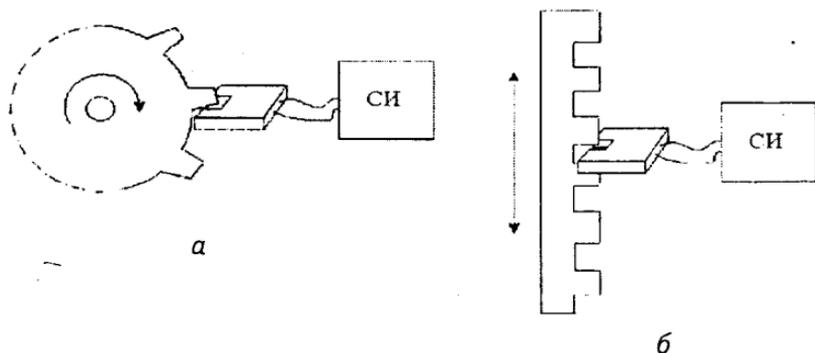


Рис. 2.39. Применение датчиков положения в качестве измерителей угловых (а) и линейных (б) перемещений

2.6.4. ТАКТИЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Датчики воспроизводят осязательную способность человека. С их помощью можно обнаружить некоторый объект, определить его координаты в пространстве, распознать форму объекта, выявить ориентацию объекта при захвате, обнаружить проскальзывание объекта после захвата.

Различают тактильные датчики с подвижным щупом и тактильные матрицы. Датчики с подвижным щупом применяют для обнаружения контакта с объектом (рис. 2.40). При касании объекта щуп поворачивается вокруг оси. Второй конец щупа воздействует на чувствительные элементы датчиков положения.

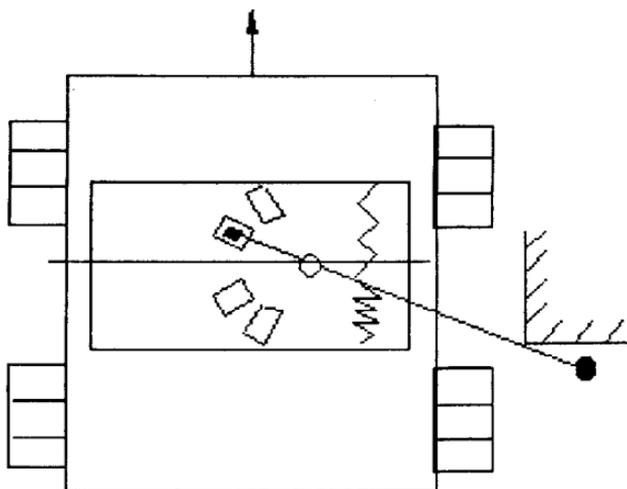


Рис. 2.40. Тактильный датчик с подвижным щупом

Установка нескольких тактильных датчиков непосредственно на захватном устройстве позволяет получить информацию о взаимодействии с объектом манипулиро-

вания (рис. 2.41). Датчики 1, 2, 3, 4 сигнализируют, что произошло касание объекта захватным устройством. Если датчики 5, 6 сработали при закрытом захватном устройстве, то захвата объекта не произошло. Если датчики 5, 6 сработали при неполном закрытии захватного устройства, то захват объекта произошел.

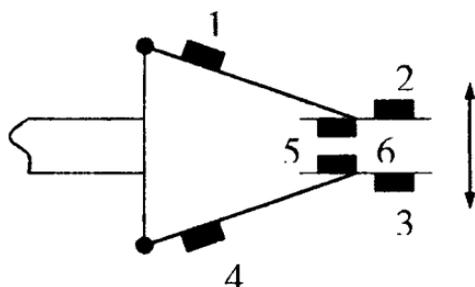


Рис. 2.41. Размещение тактильных датчиков на захватном устройстве

Различают тактильные датчики касания, контактного давления и проскальзывания. Датчики касания отличаются от датчиков контактного давления наличием порога срабатывания от действия заданной силы. Простейшим датчиком касания является путевой переключатель с подвижным щупом, срабатывающий при соприкосновении с объектом.

Для подводного робота разработан герметизированный датчик касания [16], состоящий из резиновой полусферы 1 с усами 2, на внутренней стороне которой закреплен постоянный магнит 3, воздействующий на геркон 4 (рис. 2.42). При касании подводного объекта мембрана деформируется. Перемещение магнита приводит к переключению геркона.

Разработаны конструкции тактильных датчиков на основе эластомеров и углеродных волокон.

Эластомер представляет собой шнур из силиконового каучука, проводящего электрический ток за счет

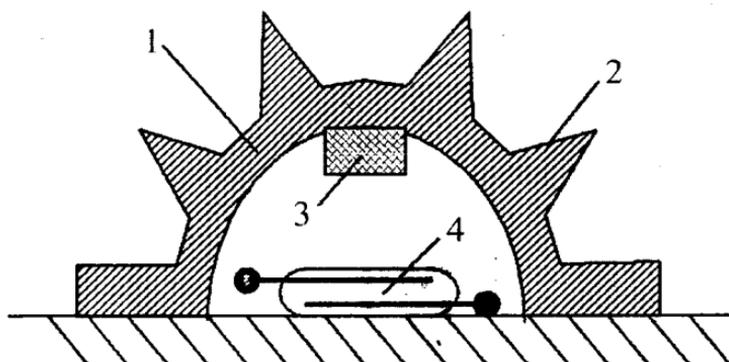


Рис. 2.42. Тактильный датчик

1 — резиновая мембрана; 2 — усы,
3 — постоянный магнит; 4 — геркон

добавок из металлического порошка. Эластометр 1, к которому прикладывается измеряемое усилие, и трубчатый проводник 2 накладывают друг на друга и подключают к источнику питания (рис. 2.43).

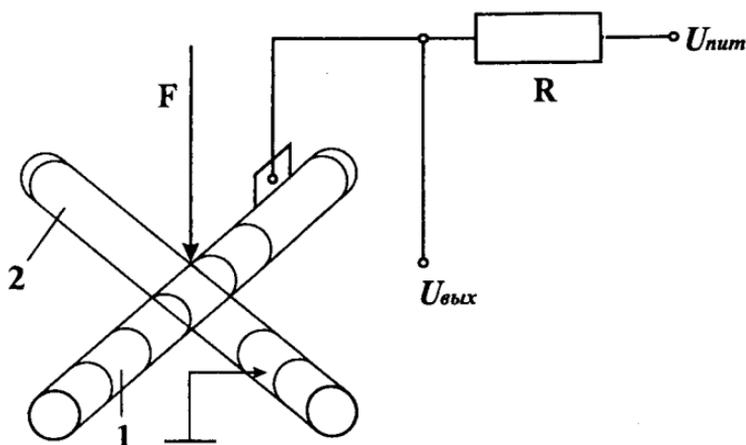


Рис. 2.43. Эластомерный датчик силы касания:

1 — эластомер, 2 — трубчатый проводник

Площадь и, соответственно, сопротивление контакта на пересечении эластомера с проводником зависит от силы нажатия F . Сила измеряется как напряжение U , снимаемое с делителя напряжения «резистор R — эластомер 1 — контакт — проводник 2». При длительной эксплуатации датчика в эластомере образуются усталостные трещины, изменяющие его проводимость.

Тактильная матрица из углеродного материала представляет собой два слоя углеродных волокон диаметром 7–30 микрон, перпендикулярно наложенных друг на друга. На пересечениях волокон образуются электрические контакты, сопротивление которых зависит от площади и силы (F) сжатия слоев x и y (рис. 2.44).

Так, пересечение двух волокон диаметром 0,5 мм в ненагруженном состоянии имеет сопротивление 2 кОм, а при нагрузке 10 Н снижается до 1 кОм. Конструктивно углеволоконные датчики изготавливают в виде стеклоткани с нитями графита или материала войлочной структуры из уплотненных отрезков углеродных волокон.

Тактильные датчики формы объекта выполнены в виде тактильной матрицы, представляющей собой упорядоченный набор тактильных датчиков на внутрен-

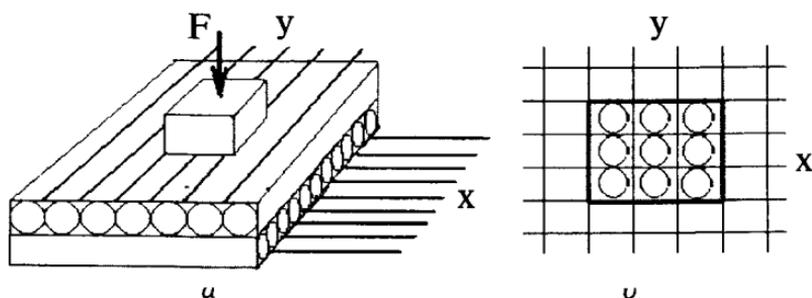


Рис. 2.44. Углеволоконный датчик касания: x — продольные углеродные волокна; y — поперечные углеродные волокна

ней поверхности захватного устройства. Форма объекта распознается по распределению сигналов элементов. В качестве чувствительных элементов тактильных матриц применяют разбитые на квадраты пленки из монокристаллического кремния, структуры «кремний-на-сапфире», фольговые тензорезисторы, диэлектрические материалы с металлизированной поверхностью. При расположении элементов матрицы снаружи робота оценивают параметры взаимодействия с внешними объектами. Тактильные матрицы обычно размещают на внутренней поверхности пальцев захватного устройства. Размещение сработавших датчиков относительно несработавших позволяет сформировать тактильный образ захваченного объекта.

Захватное устройство на рис. 2.45 оснащено тактильной матрицей из упорядоченных кнопок 1 с экранами между светодиодом 2 и фотодиодом 3. Контактирующие с объектом кнопки утапливаются и перекрывают оптический зазор между источником и приемником света. Форма захваченного объекта распознается по совокупности неосвещенных фотодиодов.

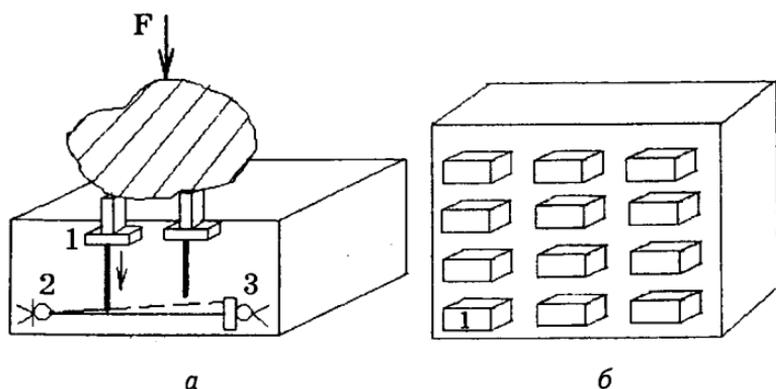


Рис. 2.45. Представление тактильного образа объекта в захватном устройстве:

1 — кнопка; 2 — светодиод; 3 — фотодиод

На рис. 2.45 показано захватное устройство, распознающее форму объекта по величине перемещения стержней.

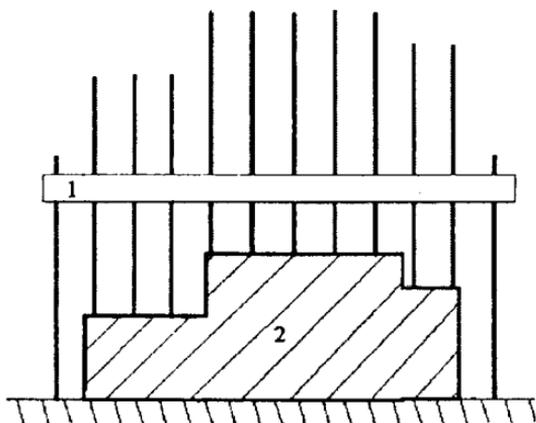


Рис. 2.46. Отображение формы объекта при захвате:
1 — пластина в захватном устройстве; 2 — объект

Развиваются работы по созданию «искусственной кожи» — тактильных матриц на поливинилфторидной пленке с малой удельной плотностью, высокой эластичностью, прочностью и широким диапазоном воздействия. Принцип формирования тактильного образа с помощью «искусственной кожи» (рис. 2.47) состоит в том, что пленка 1, разбитая на квадраты с некоторой проводимостью R , помещается между электродами 2 и 3. При нажатии на верхний электрод 2 пленка сжимается и ее проводимость местами увеличивается, что позволяет измерить давление P в разных точках по величине проходящего через них тока.

Датчики проскальзывания применяют для поддержания минимальной силы захвата при манипулировании хрупкими и легкоповреждаемыми предметами.

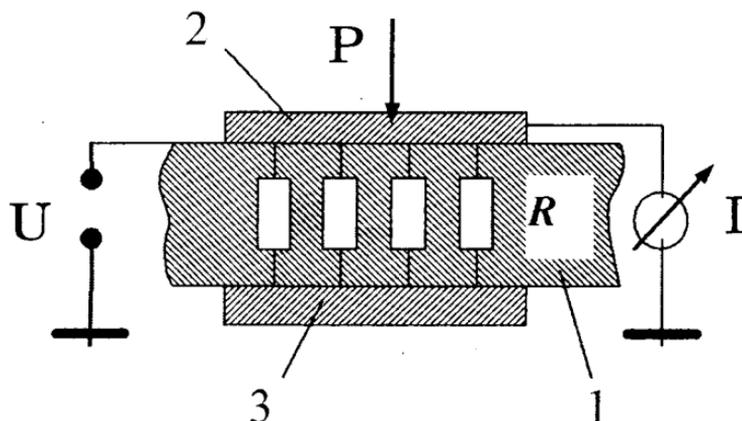


Рис. 2.47. Схема «искусственной кожи»:
1 — полупроводящая пленка; 2, 3 — электроды

Проскальзывание определяют тремя способами — по вибрациям в процессе проскальзывания, по линейному перемещению объекта и по направлению изменения давления между губками захватного устройства. Датчик проскальзывания по перемещению объекта может быть выполнен в виде резинового ролика 1 с магнитом 2 (рис. 2.48). При проскальзывании объекта 3 ролик поворачивается относительно магнитной головки 4, установленной в захватном устройстве 5.

В многофункциональных тактильных датчиках конструктивно совмещаются контроль приближения, касания, проскальзывания, что позволяет уменьшить габариты системы очувствления, сократить номенклатуру датчиков очувствления, упростить алгоритм захвата объекта. Тактильные датчики функционируют в условиях непосредственного воздействия внешней среды, поэтому к ним предъявляются специальные требования по габаритам, износостойкости, пыле- и влагозащищенности, температуростойкости, механической прочности.

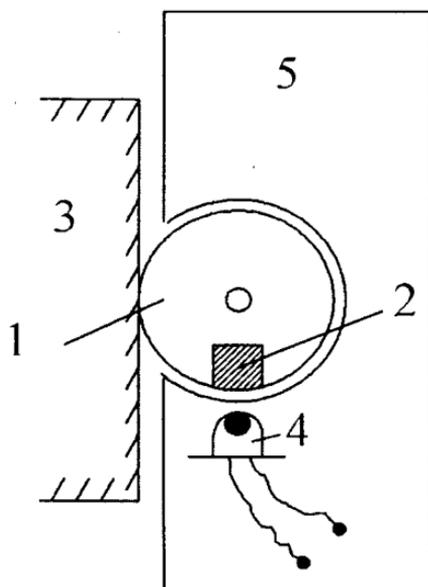


Рис. 2.48. Датчик проскальзывания: 1 — резиновый ролик; 2 — постоянный магнит; 3 — объект; 4 — магнитная головка; 5 — губка захватного устройства

2.6.5. СИЛОМОМЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ

Предназначены для измерения компонентов вектора сил и моментов, действующих на рабочий орган манипулятора. Датчики размещают либо в губках захватного устройства, либо между последним звеном и захватным устройством. Силомоментный датчик может быть размещен вне робота, например в основании стола, на котором находится объект манипулирования. Преобразование сил и моментов в электрический сигнал осуществляется путем съема электрического сигнала с преобразователя усилий или измерением перемещения подпружиненной платформы, на которой находится объект.

Для преобразования усилий чаще всего применяют проволочные, полупроводниковые или фольговые тензорезисторы. Проволочные тензорезисторы представляют собой 30–40 прямоугольных витков высокоомного провода, размещенных между гибкими подложками. Тензорезистор наклеивают на деформируемую поверхность так, чтобы длинная сторона витков была направлена вдоль линии деформации (рис. 2.49).

Полупроводниковые тензорезисторы более чувствительны к деформациям, однако их сигнал зависит от окружающей температуры. Фольговые тензорезисторы выпускают широкой номенклатурой. Они нечувствительны к изменению температуры, но требуют применения высококачественных усилителей выходного напряжения. Усилия измеряют по изменению сопротивления R тензорезистора, включенного в плечо моста Уитстона.

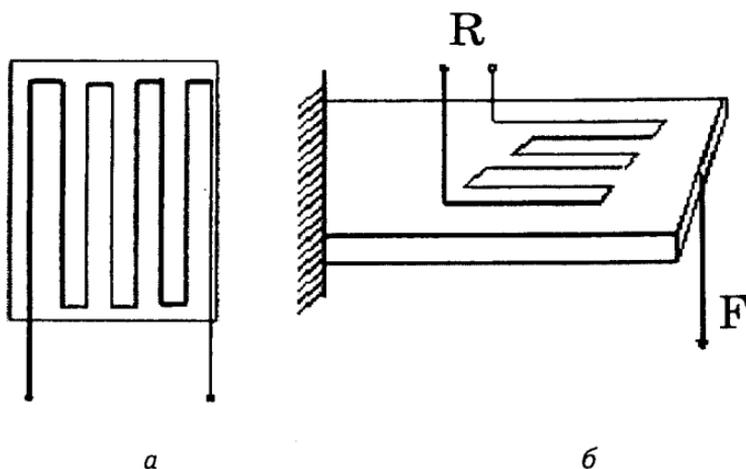


Рис. 2.49. Измерение усилий проволочным тензорезистором: *а* — вид тензорезистора; *б* — наклейка тензорезистора на поверхность, деформируемую при приложении силы F

Пьезоэлектрический датчик динамических усилий представляет собой кварцевую или пьезокерамическую шайбу (2), установленную в цилиндрический корпус (1) между опорами (рис. 2.50, а).

При деформации шайбы под действием силы (F) на обкладках (3) шайбы образуется заряд, который измеряют прибором (4). Для измерения статических усилий применяют пьезоэлемент (2) трубчатой формы, к одному концу которого подключен генератор (5) синусоидальных колебаний, а к другому — измерительное устройство (4) (рис. 2.50, б). Пьезоэлектрические силовые датчики отличаются простотой и малыми габаритами, однако реагируют на повышенную влажность.

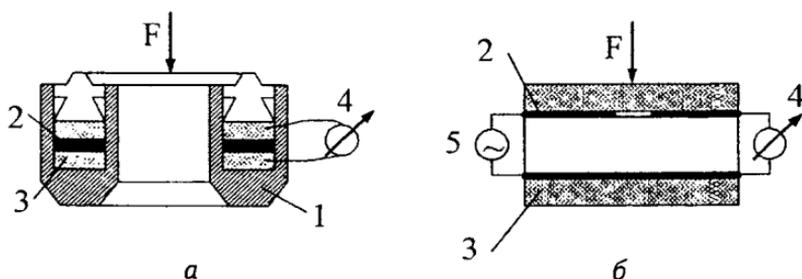


Рис. 2.50. Пьезоэлектрические датчики динамического (а) и статического (б) усилий: 1 — корпус; 2 — пьезоэлемент; 3 — демпфер; 4 — измерительное устройство; 5 — генератор

Магнитоупругий датчик, использующий эффект изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием силы, выполнен аналогично трансформатору переменного тока с взаимно перпендикулярными первичной и вторичной обмотками (рис. 2.51). Без нагрузки напряжение $U_{\text{вых}}$ во вторичной обмотке равно нулю. При приложении нагрузки F сердечник деформируется и обмотки становятся неперпендикулярными друг другу. Во вторичной обмотке появляется напря-

жение, пропорциональное нагрузке на сердечник. Такие датчики могут использоваться при высоких давлениях, влажности и радиации, где не требуется высокая точность, а нагрузка превышает 10 Н.

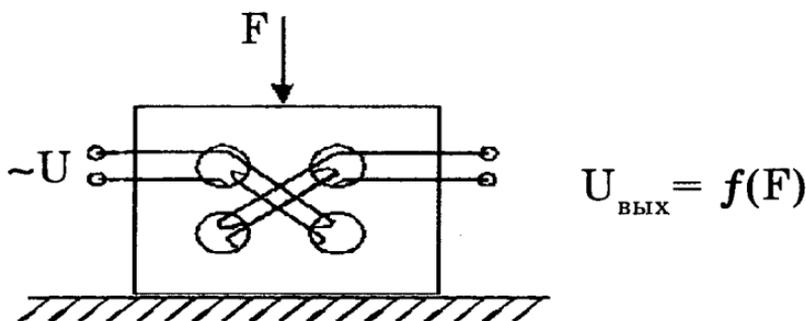


Рис. 2.51. Работа магнитоупругого датчика усилий

В адаптивных роботах, как правило, применяют многокомпонентные силомоментные датчики, в которых одновременно выделяется до шести компонентов вектора сил или моментов. При разработке таких датчиков можно упростить механическую часть датчика, поручив выделение компонентов блоку, либо выделять компоненты в механической части путем размещения чувствительных элементов в соединении звеньев манипулятора. Иллюстрацией второго способа является силомоментный датчик, в котором звенья (2) и (4) соединены крестообразной пластиной (1), на концах которой с двух сторон наклеены тензорезисторы (3) (рис. 2.51). Каждая пара тензорезисторов дает сигнал, пропорциональный разности деформаций противоположных концов пластины. Это позволяет определить деформации изгиба и кручения в соединении звеньев.

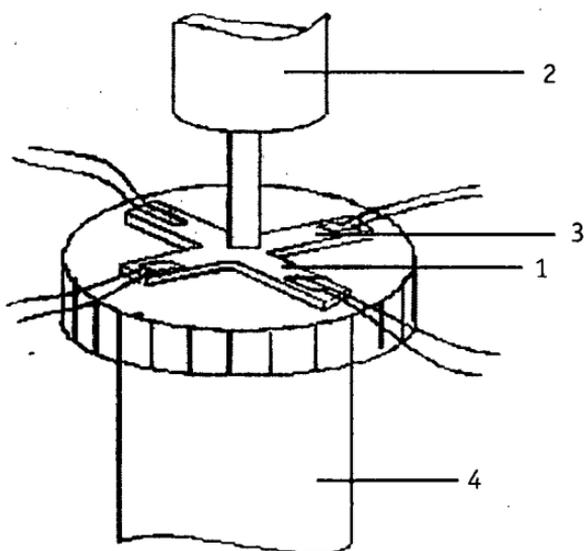


Рис. 2.52. Многокомпонентный силомоментный датчик:
 1 — крестообразная пластина; 2 — предыдущее звено;
 3 — тензорезистор; 4 — последующее звено

Приведем два примера, где необходимо применять силомоментные датчики. Без измерения усилий при вводе вала (1) в отверстие, например при сборке часов, робот не сможет точно вставить вал в отверстие с заданными координатами, поскольку погрешность позиционирования в соединении звеньев манипулятора в десятки раз выше допустимого зазора между валом и отверстием. Если в соединении захватного устройства с последним звеном манипулятора поставить силомоментный датчик (2) (рис. 2.53), то по перераспределению сигналов между компонентами сил удастся разделить этапы поиска поверхности, поиска отверстия, локализации отверстия и, соответственно, изменять программу управления движением захватного устройства так, чтобы совокупность сил реакции была равна нулю.

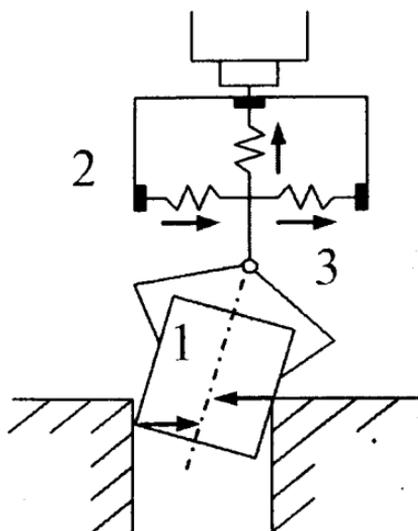


Рис. 2.53. Ввод вала (1) в отверстие при оснащении захватного устройства (3) силомоментным датчиком (2)

При дистанционном копирующем управлении манипулятором оператор не чувствует нагрузок в звеньях манипулятора, что приводит к неправильной динамике управления движением звеньев. С целью создания эффекта активного присутствия оператора в рабочей зоне манипулятора в соединениях звеньев манипулятора устанавливают силомоментные датчики, сигналы которых передают на силовые нагрузатели задающего органа оператора. Чем больше усилия в звеньях манипулятора, тем больше становится сопротивление перемещению звеньев задающего органа оператора. Таким образом, оператор чувствует усилия, возникающие при дистанционном управлении манипулятором, и, соответственно, корректирует свои движения.

Силомоментное очувствление роботов особенно эффективно при роботизированных операциях сборки, абразивной зачистки и шлифовки изделий.

2.6.6. ЛОКАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

Локационные датчики применяют для измерения расстояний до объектов, обнаружения препятствий, скорости движения и размеров объектов. Они необходимы для наведения захватного устройства на движущиеся и неориентированные объекты, предотвращения столкновений мобильных роботов с препятствиями, определения координат объектов и роботов.

Разработаны акустический, магнитный, оптический, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический, электромагнитный, пневматический и другие физические принципы локации. При пассивной локации локационный датчик воспринимает сигналы, непосредственно излучаемые объектом. При активной локации локационный датчик определяет расстояние, сравнивая прямой и отраженный от объекта сигналы.

Информационные локационные датчики измеряют расстояние до объектов для изменения поведения робота. Локационные датчики безопасности предназначены для защиты движущихся объектов от столкновений. Различают системы ближней и дальней локации. Системы ближней локации измеряют расстояния в единицах сантиметров. Системы дальней локации измеряют расстояния в сотни метров.

Самый распространенный метод ультразвуковой локации основан на способности упругих волн частотой более 20 кГц отражаться от границы раздела твердых, жидких или газообразных сред. Он заключается в сопоставлении излучаемых и отраженных от неоднородностей среды акустических импульсов. Датчики с импульсным излучением ультразвуковых колебаний работают на частоте 0,05–1 МГц с частотой повторения импульсов 10–100 Гц, что обеспечивает измерение расстояний 10–10000 м с погрешностью до 5%. Датчики с непрерывным излучением ультразвуковых колебаний выделяют информацию об отраженном сиг-

нале, заложенную в амплитуде, частоте или фазе волн. Для излучения и приема ультразвуковых колебаний используют пьезоэлектрические керамические или магнитострикционные преобразователи. При увеличении частоты с 0,02 до 1 МГц уменьшается дальность действия и растет разрешающая способность измерений. Акустические датчики удобны для оптически непрозрачных сред, обеспечивая измерение расстояний в воздухе до 2 км, в жидкости — до 40 м с погрешностью 2% от измеряемого расстояния.

Структура ультразвукового локационного датчика показана на рис. 2.54.

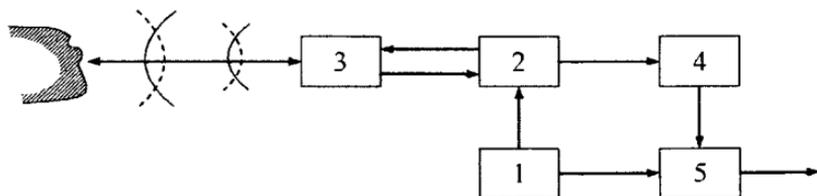


Рис. 2.54. Схема ультразвукового локационного датчика:
 1 — генератор; 2 — коммутатор; 3 — излучатель-приемник;
 4 — усилитель-формирователь; 5 — преобразователь

Генератор (1) вырабатывает пакеты ультразвуковых импульсов, которые через коммутатор (2) поступают в излучатель-приемник (3), направленный в сторону объекта. Затем коммутатор переключает излучатель-приемник в режим приема отраженных от поверхности объекта импульсов. Эти импульсы через усилитель-формирователь (4) поступают в преобразователь (5), где сравниваются с импульсами, вырабатываемыми генератором (1). Расстояние до объекта определяют по разности фаз между прямым и отраженным импульсами.

Оптический метод локации основан на эффекте отражения световых импульсов от поверхности объекта. По сопоставлению прямого и отраженного импульсов

удаётся довольно точно измерить расстояние до объекта. На рис. 2.55 показана схема определения расстояний оптическим методом.

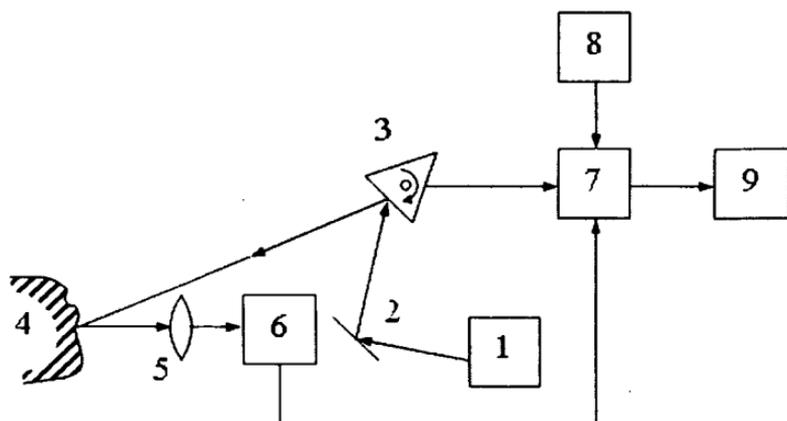


Рис. 2.55. Схема определения расстояний оптическим методом: 1 — генератор световых импульсов; 2 — зеркало; 3 — зеркальная призма; 4 — объект; 5 — линза; 6 — фотоприемник; 7 — коммутатор; 8 — генератор импульсов

Световые импульсы от генератора (1) через плоское зеркало (2) направляются на вращающуюся трехгранную зеркальную призму (3) и отражаются от нее, проходя по поверхности объекта (4). Отраженные от объекта импульсы через систему линз (5) поступают в фотоприемник (6). При прохождении призмы (3) через исходное положение коммутатор (7) подключает генератор электрических импульсов (8) к счетчику импульсов (9), а при попадании импульса света на фотоприемник (6) — отключает генератор (8). Число импульсов, накопленных в счетчике (9) за время между подачей прямого и приемом отраженного импульсов, пересчитывают в расстояние до объекта.

По аналогии с акустическим эхо-методом возможно определение расстояний путем измерения сдвига по фазе между прямым и отраженным оптическими или инфракрасными импульсами. Расстояние в диапазоне 0,3–4,0 м определяют с точностью 3 см.

Лазерные дальномеры определяют расстояния по времени прохождения светового импульса или сдвига по фазе между прямым и отраженным импульсами. Для расстояний менее 3 м время между прямым и отраженным импульсами соизмеримо с длительностью импульса, поэтому вместо измерения времени прохождения импульса применяют фазовый метод.

Системы ближней локации определяют расстояния в единицы сантиметров, например, при захвате объекта или оценке положения поршня гидроцилиндра. Для этого используют электромагнитные, емкостные, вихретоковые или струйные датчики.

Электромагнитные методы локации позволяют определить расстояние до объекта, электрическую проводимость и магнитную проницаемость объекта, нарушения сплошности материала, скорость перемещения и форму объекта. Выделяют магнитный, вихретоковый и радиоволновой электромагнитные методы локации.

При магнитном методе измеряют напряженность постоянного или низкочастотного переменного магнитного поля с помощью индукционных катушек, магнитомодуляционных преобразователей (феррозондов), датчиков Холла, магнитодиодов и магнитотриодов. Метод позволяет измерять расстояния от 0,001 до 100 мм с погрешностью 3–5%. При вихретоковом методе в качестве преобразователя используют катушки, расположенные вблизи металлического объекта и питаемые переменным током частотой 0,2–50 МГц. Метод позволяет измерять расстояние до объекта от единиц до десятков сантиметров с погрешностью 3–10%. Вихретоковые преобразователи могут работать в агрессивных средах и при повышенных температурах,

например при измерении отклонения сварочной головки от шва. Они позволяют обнаружить металлические предметы с размерами не менее 0,01 размера преобразователя на расстоянии, не превышающем половину линейного размера преобразователя.

Радиоволновой метод основан на изменении интенсивности, амплитуды, фазы, частоты и других параметров излучения волн длиной 1–100 мм при взаимодействии с объектом. Радиационные локационные датчики используют изменения характеристик поля радиации при взаимодействии с объектом. В датчиках прямого излучения источник радиоактивного излучения размещают на подвижном объекте, а приемник — в месте измерения. Расстояния измеряют в диапазоне с погрешностью 2–3% при времени измерения около 0,1 с. В датчиках рассеянного излучения источник и приемник располагают на объекте и измеряют расстояния от 0,1 до 10 м с погрешностью 0,5–3%.

Работа емкостных локационных датчиков основана на измерении частоты колебаний генератора, зависящей от диэлектрической проницаемости среды между обкладками задающего частоту конденсатора и расстояния до объекта.

Струйные локационные датчики используют эффекты прерывания струи, турбулизации ламинарной струи, перекрытия турбулентной струи, преодоления заданного давления, обработку импульсов прерывания струи. Пневматические преобразователи создают в виде сопла-заслонки, кодовой системы сопел, струйных частотных и пневмоакустических устройств. С их помощью можно определять линейное перемещение на расстоянии от 0 до 4 мм с погрешностью 0,5–3% и чувствительностью 200 Па/мкм, наличие объекта на расстоянии до 20 мм с погрешностью 2–8%.

В пневматическом локационном датчике (рис. 2.56) измеряемое давление (P_1) линейно зависит от расстояния до объекта, если расстояние близко к диаметру

сопла. При закрывании сопла объектом оно равно опорному давлению (P_0). По мере удаления объекта от сопла на расстояние до 6 мм давление (P'_1) уменьшается. Расстояние измеряют с погрешностью 1,5% и чувствительностью 100 Па/мкм.

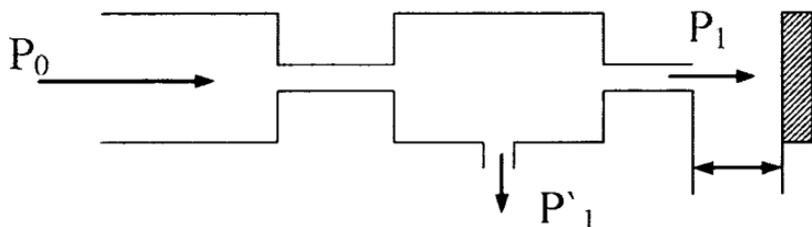


Рис. 2.56. Измерение расстояний пневматическим датчиком ближней локации

Пневматические локационные датчики отличаются малыми размерами и массой, высокой надежностью, простотой, возможностью работы в условиях взрывоопасности, радиации, электромагнитных помех, вибраций, ударов, высокой температуры, запыленности. В них используется тот же вид энергии, что в роботах с пневмоприводом. Быстродействие датчиков ограничено скоростью звука и составляет около 0,02 с.

2.6.4. СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Системы технического зрения (СТЗ) представляют собой устройства, обеспечивающие восприятие оптического изображения и его преобразование в электрическую форму, выделение значимых элементов изображения и его распознавание, передачу результатов распознавания устройству управления роботом. В отличие от систем промышленного телевидения, си-

системы технического зрения обладают способностью компьютерного распознавания наблюдаемых объектов. С их помощью получают около 90% информации, необходимой для работы робота, особенно в неорганизованной среде.

В промышленности системы технического зрения используют для классификации и сортировки деталей, разбора деталей из навала, измерения координат движущихся объектов при наведении захватного устройства, определения положения и правильной ориентации деталей при сборке, для контроля качества обработки или покрытия деталей, проверки соответствия размеров деталей чертежу и многих других задач.

Задачи технического зрения делят на три группы — контроль качества изделий, идентификация объектов, управление движением. При контроле качества изготовленную деталь сопоставляют с изображением эталонной детали и выявляют их отличия. В задачах идентификации объектов распознают разные виды показываемых объектов и сортируют их по классам. При управлении движением оценивают виды препятствий на пути робота и формируют команды управления роботом.

Выделяют три типа СТЗ — распознающие, измерительные и обзорно-информационные. Распознающие СТЗ применяют для контроля качества, классификации и сортировки объектов по геометрическим параметрам. Измерительные СТЗ применяют для измерения геометрических параметров изделий и оценки их соответствия заданным. Обзорно-информационные СТЗ служат для распознавания взаимного расположения объектов с целью организации технологического процесса, например сборки.

Система технического зрения (рис. 2.57) содержит видеодатчик 1, информация с которого проходит предварительную обработку в блоке 2 и фиксируется в буферном запоминающем устройстве 3 на время обработки изображения компьютером 4.

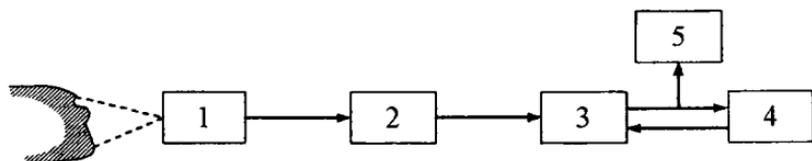


Рис. 2.57. Структура системы технического зрения:
 1 — видеодатчик; 2 — блок предварительной обработки информации; 3 — буферный регистр; 4 — компьютер;
 5 — видеоконтрольное устройство

Система работает в режимах настройки, обучения и распознавания. В режиме настройки видеодатчик наводят на освещенный объект, фокусируют изображение и задают порог градации распознаваемых признаков, например черный и белый. В режиме обучения перед видеодатчиком помещают эталонные объекты и задают в компьютере функции принадлежности эталона к определенному классу. В режиме распознавания компьютер ведет обработку видеоинформации о неизвестном объекте с помощью сложных алгоритмов распознавания образов и определяет его принадлежность к тому или иному классу эталонов.

Видеодатчик преобразует оптическую информацию в электрические сигналы. Такая задача решается, например, в цифровых фотокамерах. В качестве видеодатчиков применяли диссекторы, видиконы, приборы с зарядовой связью (ПЗС), полупроводниковые матричные фотоприемники.

Диссектор передает изображение с многоцелевого фотокатода через диафрагму на фотоумножитель, формирующий видеосигнал с максимальной разрешающей способностью 250–300 линий на площади 17×17 мм.

В видиконе изображение проецируется на плоскую мишень в виде рельефного заряда. При считывании электронный луч построчно обходит мишень, разру-

шая заряд до следующего прохода луча. В каждом кадре видеконы предоставляют до 10^6 бит информации, однако имеют малое быстродействие.

Приборы с зарядовой связью представляют собой матрицу конденсаторов из слоев металла (1), окисла (2) и полупроводника (3) (рис. 2.58).

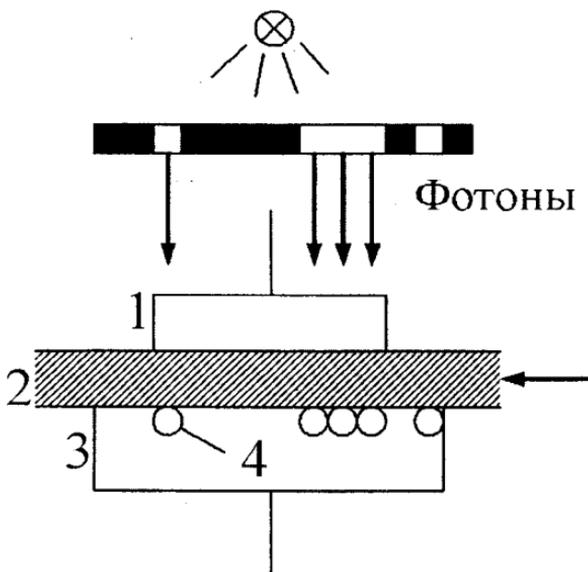


Рис. 2.58. Принцип работы прибора с зарядовой связью:
 1 — металл; 2 — окисел; 3 — полупроводник;
 4 — носители заряда

Изображение формируется в виде разной интенсивности перехода носителей заряда (4) через конденсатор под действием фотонов. После накопления зарядов они по строкам выводятся из кристалла, образуя видеосигнал. Приборы отличаются малыми габаритами и низкой потребляемой мощностью, устойчивостью в экстремальных условиях и высоким быстродействием.

Полупроводниковые матричные фотоприемники построены на кремниевых фоторезисторах, сопротивле-

ние каждого из которых зависит от освещенности светом, отраженным от объекта.

В блоке предварительной обработки преобразованное в электрическую форму оптическое изображение приводят к стандартным уровням положения, яркости и контрастности. Кроме поворота изображения, его разбивают на отдельные элементы, для каждого из которых задают уровень яркости. Для черно-белых изображений в компьютер передают матрицу из нулей (белый) и единиц (черный).

Буферный регистр задерживает кадр изображения на период его обработки компьютером. По окончании распознавания кадра в компьютер передается следующий кадр динамического изображения.

Алгоритмические методы обработки изображений в компьютере сводятся к одному из трех подходов: сопоставлению с эталоном, классификации или синтаксическому анализу структуры. В методах сопоставления с эталоном изображение объекта по точкам сравнивают с эталонами в памяти и делают вывод о принадлежности объекта к одному из классов объектов, описываемых эталоном. Для такого сравнения необходимо точное позиционирование объекта относительно датчика.

Методы классификации описывают изображение некоторыми количественными характеристиками, например геометрическими. После статистической обработки характеристик оценивается условная вероятность принадлежности объекта к одному из классов объектов. Изображение обычно разбивают на сегменты, соответствующие разным объектам. В качестве характеристик сегмента используют признаки, не зависящие от ориентации объекта и однозначно различающие объекты. Список признаков объекта сопоставляется с аналогичным списком, заложенным в ЭВМ при обучении. Синтаксические методы описывают объекты на языке формальной грамматики и классифицируют объект путем синтаксического анализа предложений.

Программное обеспечение СТЗ включает модули связи с технологическим оборудованием и отладочным комплексом, управления работой видеодатчика (преобразование изображения), вычисления признаков (описание детали стандартным набором параметров), распознавания (построение решающего правила, позволяющего путем сопоставления полученных параметров с имеющимися отнести деталь к известному классу), обучения (подготовка СТЗ к работе с новыми деталями).

Использование подвижности видеодатчика, установленного на манипуляторе, позволяет применять упрощенные методы классификации изображений. Пусть робот должен найти и захватить белый цилиндр на черном столе (рис. 2.59).

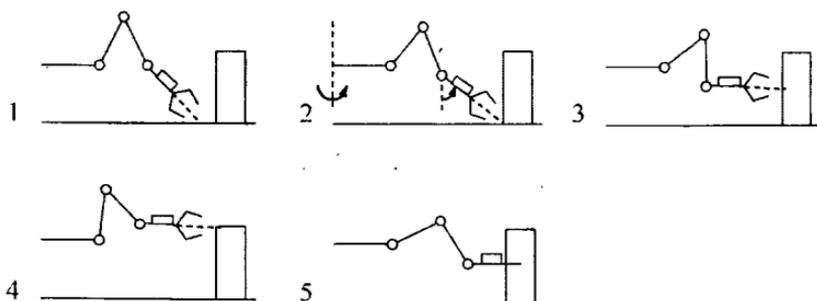


Рис. 2.59. Поиск и захват цилиндра путем подсчета белых точек изображения

Видеодатчик воспринимает изображение как белые точки на черном фоне, а компьютер подсчитывает число белых точек на изображении. Если число превышает заданный уровень, то положение цилиндра воспринимается как вертикальное и выдается команда захвата цилиндра. Программа захвата содержит последовательность шагов:

— перевод манипулятора в исходное положение (1);

— поиск цилиндра путем последовательного просмотра поверхности и подсчета белых точек при каждом цикле перемещения манипулятора, остановка манипулятора, если число точек превышает порог (2);

— установка камеры параллельно столу и проверка положения цилиндра по числу белых точек (3);

— измерение высоты цилиндра путем движения манипулятора вверх до тех пор, пока число белых точек не станет равно нулю (4);

— оценка координат центра цилиндра и наведение захватного устройства на цилиндр (5);

— захват цилиндра.

Если цилиндр лежит, то после шага 3 поднимают захватное устройство так, чтобы наблюдать цилиндр сверху, затем выполняют шаги 4–5.

Перечислим задачи зрительного восприятия в робототехнике в порядке возрастания их сложности:

— определение плоских координат известных объектов;

— распознавание отдельных двухмерных объектов;

— распознавание касающихся двухмерных объектов;

— распознавание отдельных трехмерных объектов;

— распознавание и анализ взаимного расположения групп трехмерных объектов (анализ сцен);

— распознавание трехмерных объектов, лежащих «внавал».

Кроме оптических СТЗ, разрабатываются радиационные, тепловые, радиоволновые и акустические системы технического зрения, способные работать в непрозрачных средах. *Радиационные СТЗ* просвечивают объект рентгеновскими лучами и преобразуют рентгеновское излучение в светотеневое или электронное. При компьютерной томографии получают трехмерное изображение объекта путем обработки плотности слоев изображения. *Тепловые СТЗ* основаны на распознавании неравномерного распределения температуры по поверхности нагретого тела. Они преобразуют тепло-

вое поле в яркость или цвет оптического изображения. *Радиоволновые* СТЗ содержат матрицы излучателей и приемников радиоволн сверхвысокой частоты. Принятое матрицей приемников распределение отраженных от объекта радиоволн с помощью компьютера преобразуется в радиоволновой образ объекта. *Акустические* СТЗ излучают звуковые импульсы на объект и обрабатывают совокупность отраженных сигналов по строкам на компьютере. Для однородной жидкости на расстоянии 0,3–0,5 м используют частоты 10–20 МГц, для воздуха — до 20 кГц.

2.7. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизация роботизированного оборудования включает три иерархических уровня:

— согласованное управление роботом и единицей оборудования, при котором команды управления роботом задает обслуживаемая им технологическая машина;

— управление роботом и несколькими единицами оборудования, при котором поведение робота определяется запросами от обслуживаемых им машин;

— управление распределенными роботами, единицами обрабатывающего оборудования, складами и транспортными средствами от центральной ЭВМ с целью выполнения поступающих заказов.

Устройство управления принимает сигналы от датчиков и центральной ЭВМ, после чего вырабатывает команды на исполнительные устройства в соответствии с записанной программой управления. Помимо этого, устройство управления роботом должно регулировать положение и скорости перемещения приводов звеньев, оценивать состояние обслуживаемых единиц оборудования, преобразовывать координаты распределен-

ных датчиков в координаты распределенных приводов, обеспечивать безопасность работы.

Обработку информации ведут централизованно или децентрализованно. В централизованной структуре осуществляют последовательную обработку информации для каждой степени подвижности робота. В децентрализованной структуре информация обрабатывается одновременно для всех степеней подвижности.

Одним из двух признаков робота является перепрограммируемость. Устройство управления роботом должно быть универсальным и иметь программоноситель для хранения алгоритма управления, записанного пользователем. Программоноситель должен быть энергонезависимым, чтобы не терять алгоритм при отключении питания. Программоносителями первых промышленных роботов были кулачковые командоаппараты, представляющие собой набор дисков с кулачками, укрепленных на общей оси (рис. 2.60, а). При повороте оси кулачки входили в зону чувствительности датчиков положения, которые переключали исполнительные устройства приводов звеньев. Для изменения программы менялся угол поворота диска относительно оси. Затем появились перфокарты (рис. 2.60, б), которые перемещались между источниками и приемниками света.

При попадании света на фотоприемники через пробитые согласно программе управления отверстия в перфокарте формировались команды переключения исполнительных устройств. Одновременно развивались перфоленты, имеющие меньшие габариты и более высокую емкость (рис. 2.60, в).

Следующим шагом стали диодные матрицы. Их программирование сводится к установке диодов на пересечениях горизонтальной и вертикальной шин там, где нужно записать логическую «1» (рис. 2.60, г). Горизонтальные шины соответствуют адресу слова, а вертикальные — кодовой комбинации слова по данному адресу. Число горизонтальных шин равно числу раз-

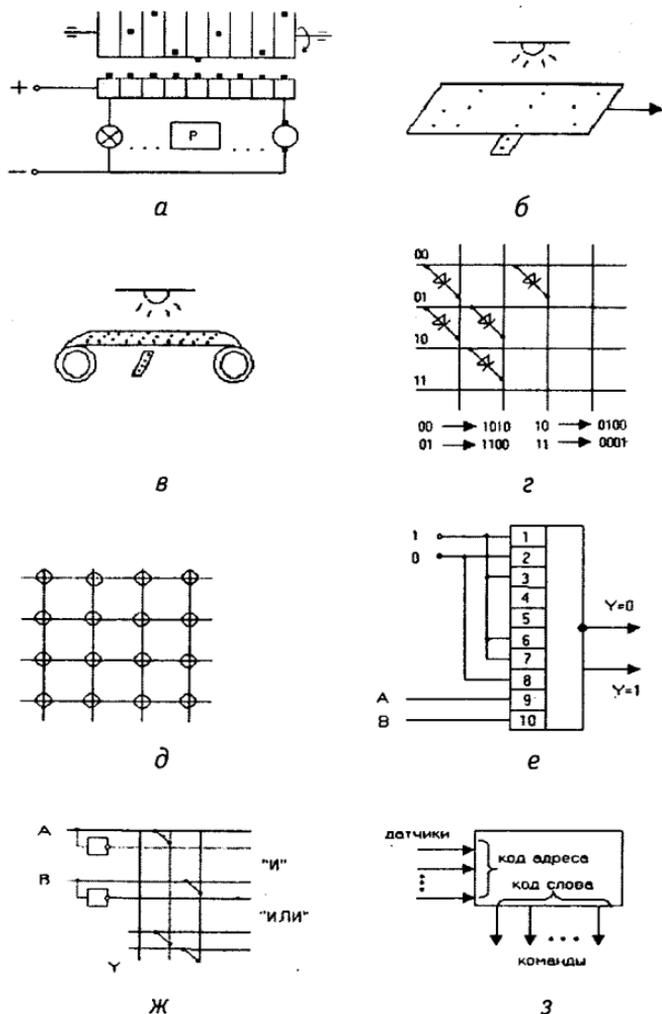


Рис. 2.60. Виды программносителей: *а* — кулачковые программоаппараты; *б* — перфокары; *в* — перфоленты; *г* — диодные матрицы; *д* — матрица на ферритовых кольцах; *е* — мультиплексор; *ж* — программируемая логическая матрица (ПЛМ); *з* — перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ)

рядов адреса, а число вертикальных шин — числу рядов слова.

Программоноситель на ферритовых кольцах использует свойство феррита переходить из одного состояния насыщения в другое и сохранять его после отключения питания (рис. 2.60, *д*). Через кольца пропускают провода вертикальной и горизонтальной шин. Информацию записывают путем подачи напряжения на провода по вертикали и по горизонтали. Кольцо переходит в состояние насыщения, которое распознается при управлении объектом. Аналогичный принцип использовался в магнитных лентах.

Появление микросхем привело к созданию мультиплексора — программируемого коммутатора каналов с несколькими входами и одним выходом (рис. 2.60, *е*). Сигналы датчиков подавали на входы А и В. Алгоритм управления задавали настроечным соединением входов мультиплексора, соответствующих тем комбинациям состояний входов, для которых выход У принимал значения «1» и «0».

Последним типом программоносителя, размеры которого зависели от объема программы управления, стала программируемая логическая матрица ПЛИМ (рис. 2.60, *ж*). Она состоит из матриц И и ИЛИ. В матрицу И вводят диодные переключки, формирующие набор состояний входных переменных А, В. В матрице ИЛИ переключки ставят там, где выходная переменная У принимает единичное значение.

С появлением перепрограммируемых запоминающих устройств с электрической записью и электрическим или ультрафиолетовым стиранием информации (ППЗУ) начался нынешний этап развития программоносителей. Шаг времени для программных роботов или комбинация сигналов датчиков для адаптивных роботов интерпретируется как код адреса в ППЗУ, по которому пользователь записывает код команд для приводов робота (рис. 2.60, *з*). В режиме управления для каждого

шага времени или комбинации сигналов вырабатываются записанные команды управления приводами.

В последнее время развиваются программноносители в виде быстросменных флэш-дисков. Флэш-диск используют для долговременного хранения сотен Мегабайт информации. Он представляет собой электрически стираемое перепрограммируемое устройство на микросхеме памяти. Флэш-диск не имеет подвижных частей, невосприимчив к ударам и вибрациям, устойчиво работает при изменении температуры от -40 до $+85$ °С со средним временем наработки на отказ более 100 лет.

Рассмотренные виды программноносителей сначала использовали в специализированных устройствах циклового, позиционного и контурного управления роботами. Затем перешли на универсальные устройства программного управления — программируемые контроллеры. Программируемый контроллер представляет собой микропроцессорное управляющее устройство, входы которого связаны с датчиками, а выходы — с исполнительными устройствами робота. Он содержит модули входных (Вход) и выходных (Выход) сигналов, центральный процессор (ЦП), оперативное (ОЗУ) и перепрограммируемое постоянное (ППЗУ) запоминающие устройства (рис. 2.61). Работа внутренних устройств синхронизируется тактовым генератором.

Принципиальное отличие программируемого контроллера от персонального компьютера заключается в его применении для управления единицей оборудования в режиме реального времени. Поэтому он должен иметь развитую подсистему связи с датчиками и исполнительными устройствами, доступное технологу программирование, удобство оперативной диагностики, повышенную надежность. В нем отсутствуют такие устройства персонального компьютера как монитор, клавиатура, звуковая карта.

Программируемый контроллер может быть трех типов:

- логический контроллер для замены релейно-контактной логики;
- регулирующий контроллер для управления непрерывными процессами;
- универсальный контроллер для дискретных и непрерывных процессов.

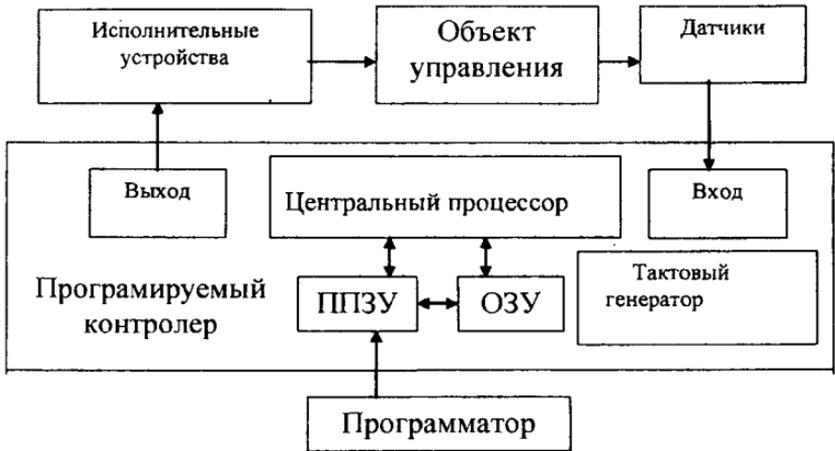


Рис. 2.61. Структура программируемого контроллера

Первые два типа со временем объединились в третий, имеющий как логические, так и аналоговые входы и выходы для управления дискретными и непрерывными процессами.

Контроллер приспособляют к управлению роботом путем составления программы управления и ее записи в запоминающем устройстве. Для этого используют портативный программатор или персональный компьютер со специальным программным обеспечением. Усложнение программ управления заставило отказаться от применения программаторов. Многообразие выпускаемых контроллеров с собственными языками программирования привело к появлению пяти стандартных языков программирования: языка лестничных диаграмм

(LD), функционально-блочных диаграмм (FBD), списка инструкций (IL), диаграмм последовательных функций (SFC), структурированного текста (ST). Стали появляться средства дистанционного программирования распределенных контроллеров от персонального компьютера через промышленную шину.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем автоматическое управление роботом отличается от человеко-машинного?

2. В чем состоят принципы разомкнутого управления, управления с компенсацией возмущений и управления по отклонению?

3. Чем отличаются программное, адаптивное и интеллектуальное управление роботом?

4. Каковы задачи исполнительного, тактического, стратегического и интеллектуального уровней управления роботом?

5. Опишите шесть способов человеко-машинного управления манипулятором.

6. Чем отличаются интерактивные системы человеко-машинного управления роботом?

7. Почему возникла необходимость в применении двухсторонних систем копирующего управления манипуляторами?

8. Какие задачи выполняют информационный и управляющий каналы при человеко-машинном управлении манипулятором?

9. Какие ограничения существуют для прямого и косвенного наблюдения за манипулятором при дистанционном управлении?

10. Сопоставьте достоинства и недостатки передачи сигналов дистанционного управления манипулятором по проводам, оптическому волокну и через атмосферу.

11. В чем заключается принцип циклового управления движением звена робота?

12. В чем заключается принцип позиционного управления движением звена робота?

13. В чем заключается принцип контурного управления движением звена робота?

14. Для каких технологических приложений применяют цикловое, позиционное и контурное управление движением звена робота?

15. В каких случаях применяют адаптивное управление роботом?

16. Чем интегральный метод распознавания отличается от структурного?

17. Чем интеллектуальный робот отличается от адаптивного?

18. Для чего нужна база знаний?

19. Как пополняется база знаний?

20. Чем база знаний отличается от базы данных?

21. Разделите три типа знаний о мире, в котором функционирует робот.

22. Как представить знания с помощью логических моделей?

23. Как представить знания с помощью сетевых моделей?

24. Как разделяют активный и пассивный объекты в семантической сети?

25. Как представить знания с помощью системы предикатов?

26. Как обобщить знания с помощью фрейма?

27. Что такое задача преобразования сцен и как ее решают?

28. Чем распознавание образов отличается от преобразования сцен?

29. Почему соприкасающиеся объекты распознавать труднее, чем отдельные?

30. Сопоставьте способы прямого обучения и программирования роботов.

31. На какие уровни делят способы программирования роботов?

32. Перечислите типы датчиков, применяемых в робототехнике.

33. Чем измерители перемещений отличаются от датчиков положения?

34. Чем аналоговые измерители отличаются от дискретных? Перечислите виды аналоговых и дискретных измерителей перемещений.

35. На какие группы делят тактильные датчики?

36. Для чего требуется измерять усилия в звеньях манипулятора?

37. Какими методами измеряют усилия в звеньях манипулятора?

38. Какой эффект используется при измерении усилий с помощью тензорезистора?

39. Может ли тензорезистор изменять свой сигнал при сжатии?

40. По каким признакам классифицируют локационные датчики?

41. На чем основана работа ультразвукового локационного датчика?

42. Перечислите основные элементы систем технического зрения и их функции.

43. Как работают диссектор, видикон, прибор с рядовой связью, матричный фотоприемник?

44. В каких режимах работает система технического зрения?

45. Какие задачи должно выполнять устройство управления роботом?

46. Чем программируемый контроллер отличается от персонального компьютера?

47. Чем регулирующий программируемый контроллер отличается от логического?

48. Почему программируемый контроллер относится к универсальным управляющим устройствам?

49. Как контурное управление роботом заменить на позиционное?

3. ПРИЛОЖЕНИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

3.1. ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА К ПРИМЕНЕНИЮ РОБОТОВ

Роботизация производства становится необходимой, если:

- условия работы опасны или вредны для человека;
- ручное выполнение операции не обеспечивает приемлемого качества;
- ограниченные возможности человека стали препятствовать развитию производства.

Сложилось три формы применения робототехники в промышленном производстве:

— обслуживание основного оборудования, например подача заготовки и снятие детали;

— непосредственное выполнение технологических основных операций, таких как резание, сварка или нанесение покрытий;

— транспортирование объектов от одной единицы оборудования к другой.

На этапе предварительного отбора объектов роботизации оценивают условия и характер труда рабочих, техническую возможность и источники эффективности роботизации. Выделяют процессы с особо тяжелыми и вредными для человека условиями труда, например для работ в зоне радиоактивного загрязнения. Окончательный отбор ведут в последовательности от наиболее предпочтительных к наименее предпочтительным объектам роботизации. Оценивают объекты производства и технологическое оборудование с позиции роботизации, анализируют возможность выполнения

разных заказов на одной технологической линии, устанавливают возможность привязки средств робототехники к существующему оборудованию и организации каналов связи, определяют способы контроля качества выполняемых операций. Выявляют рабочие места с вредными и опасными условиями труда. Оценивают величину потерь, обусловленных работой в неблагоприятных условиях: доплату за тяжелые и вредные условия труда, дополнительный отпуск, сокращенный рабочий день, льготное пенсионное обеспечение, потери от профзаболеваний, дополнительные расходы на обеспечение безопасности работы, потери, связанные со снижением производительности и травматизмом, уровень нехватки рабочей силы.

Затем сравнивают варианты модернизации существующего процесса путем ввода специализированных полуавтоматов, перепрограммируемых полуавтоматов и промышленных роботов.

Последний вариант выбирают, если он даст наибольший эффект. Благоприятными предпосылками роботизации являются:

- малооперационная технология;
- многократное повторение одинаковых рабочих циклов;
- возможность перемещения объектов по одинаковым траекториям;
- фиксация в пространстве начальной и конечной точек перемещения;
- синхронизация роботизируемого и смежных процессов;
- постоянство положения объектов роботизации;
- одинаковость объектов манипулирования.

Подготовку процесса к роботизации осуществляют в несколько этапов.

1. Анализ существующего производственного процесса с целью выявления «узких мест» и путей их устранения.

Процесс изготовления детали отображают последовательностью основных и вспомогательных технологических операций, операций транспортирования, хранения и задержки. В ней выделяют операции, выполняемые человеком, отмечают время операций и задержек, расстояние доставки, количество деталей в партии. Затем рассматривают варианты совмещения и устранения отдельных операций, возможность выполнения некоторых операций роботом. На этом этапе может быть получен эффект за счет реорганизации технологии без применения роботов.

2. Формирование детали-представителя, включающей совокупность признаков партий деталей, которые будут выпускаться.

Таковыми признаками являются операции обработки, форма, размеры и материал детали, класс точности обработки, способ захвата.

3. Определение цели роботизации.

Выявляют главную цель роботизации. Это может быть:

- повышение производительности труда путем увеличения выпуска продукции при сохранении численности рабочих;
- сокращение трудоемкости работ за счет устранения организационных и технологических потерь;
- повышение качества изделий за счет стабилизации рабочих операций;
- улучшение условий работы путем вывода рабочих из мест с вредными воздействиями;
- повышение безопасности труда путем вывода рабочих из опасных зон.

Оценивают источники экономической и социальной эффективности роботизации. Если экономическая эффективность оценивается известными методами, то при оценке социальной эффективности требуется стоимостная оценка факторов улучшения условий работы и повышения безопасности труда. Она должна учитывать

потери от временной нетрудоспособности и профзаболеваний, нехватки и текучести кадров, прогулов и неявок на работу, внутрисменного отдыха, затраты на охрану труда и технику безопасности, строительство и содержание жилищных и культурно-бытовых помещений, плату за трудовые ресурсы, различные компенсации и выплаты. Стоимостная оценка социальной эффективности применения робототехники для подземных работ на шахтах Кузбасса [17] показала, что доля 14 факторов социальной эффективности превышает 120% зарплаты высвобождаемого горнорабочего и увеличивается на 15–20% в год.

4. Разделение процесса на операции и их анализ с позиции роботизации.

Оценивают операции с позиции роботизации и разрабатывают рекомендации по подготовке операций к роботизации. Такими рекомендациями являются обеспечение одинакового позиционирования объектов обработки, получение информации от смежных технологических звеньев, автоматизация удаления отходов, обеспечение автоматической подачи объектов к месту обработки, контроль работоспособности оборудования и качества обработки.

5. Разработка структурной схемы роботизированного производства.

Разрабатывают варианты ввода робототехники и оценивают их с позиции поставленной цели. Анализируют варианты планировки роботизированных участков, технологических маршрутов, оснастки и вспомогательного оборудования.

На этом этапе требуется моделировать варианты взаимодействия роботов и технологического оборудования в роботизированном производстве. Выбранная схема должна обеспечивать фиксацию автоматически обрабатываемых деталей, безопасный доступ оператора к рабочей зоне, накопление и поштучную подачу ориентированных заготовок, переориентацию деталей,

захват любой детали из запускаемых партий. В результате выбирают вариант, для которого разрабатывают компоновочную схему и рабочую планировку робототехнической системы.

6. Разработка системы безопасности персонала.

Разрабатывают средства отключения оборудования при появлении человека в рабочей зоне, защиты движущихся частей от столкновений, средства предупреждения персонала об опасности.

7. Подготовка персонала к обслуживанию робототехники.

Ведут обучение персонала взаимодействию с работающим роботизированным оборудованием, перепрограммированию устройств управления, соблюдению правил безопасности.

8. Составление программ управления роботизированным оборудованием.

Разрабатывают управляющие программы для партий деталей, подлежащих изготовлению.

3.2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИЗМЕНЧИВОСТИ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТА

Выбор того или иного поколения роботов определяется изменчивостью среды, в которой он будет работать. От этого зависят затраты на роботизацию рабочего места. Так, для поиска неисправностей оборудования потребуются имитация интеллектуальных свойств человека, в то время как для монотонных погрузочно-разгрузочных операций по обслуживанию единицы оборудования достаточно применить робот первого поколения. Если же положение объекта манипулирования будет изменяться, то от робота потребуются распознавание его положения и соответствующее изменение программы управления.

Как оценить степень изменчивости среды для объекта роботизации? Некоторые изменения среды, например изменения атмосферного давления, могут вообще не влиять на управление роботом. Следовательно, надо выявить только такие изменения среды, которые повлияют на процесс управления.

Известные методы оценки сложности управления, зависящей от изменчивости среды, можно разделить на две группы: по внешним параметрам управления и по сложности записи алгоритма управления. К первой группе относят подсчет числа переключений органов управления за рабочий цикл или числа исполнительных устройств объекта при заданном объеме логических операций на одно устройство. Сложность управления может оцениваться числом элементарных операций в единицу времени. При этом не учитываются изменения алгоритма во времени, разнообразие технологических ситуаций, логических условий и операций.

Методы второй группы точнее, однако требуют трудоемкой и не всегда возможной формализации алгоритма управления. К ним относятся подсчет числа строк таблицы переходов, членов логической схемы алгоритма, логических условий, входов и выходов, а также оценка связности вершин граф — схемы алгоритма. Существующие методы оценки не учитывают вероятностный характер управления в неорганизованной среде и не позволяют сравнивать процессы между собой.

Представим модель управления роботом в виде ориентированного мультиграфа, содержащего начальную A_0 , конечную A_q , узловые $B_1, \dots, B_p, \dots, B_m$ и промежуточные $A_1, \dots, A_k, \dots, A_{q-1}$ вершины, соединенные дугами, взвешенными вероятностями (рис. 3.1).

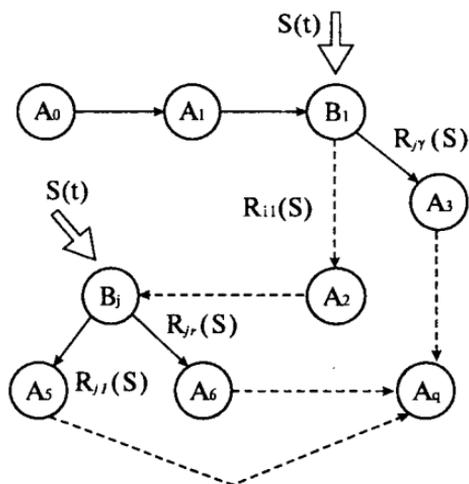


Рис. 3.1. Модель управления роботом в изменяющейся среде

В k -й промежуточной вершине за время τ_k переключается одно из исполнительных устройств объекта. В j -й узловой вершине выбирается одно из r решений $R_{j\gamma}$ с условной вероятностью:

$$P_{j\gamma} = \frac{P(R_{j\gamma} \cap S_i)}{P(S_i)} ; \left(\gamma = 2, \dots, r; \sum_{\gamma=2}^r P_{j\gamma} = 1 \right),$$

зависящей от вероятности $P(S_i)$ изменения технологической среды в i -м рабочем цикле и вероятности $P(R_{j\gamma} \cap S_i)$ выбора в среде S_i γ -го решения при условии функциональной стабильности оператора, управляющего процессом. Узловые вершины, связанные с контролем переключения исполнительного устройства, например B_2 , приводятся к промежуточным. Реализация алгоритма в i -м рабочем цикле представляет собой последовательность дуг от начальной к конечной вершинам m_i через узловые вершины, имеет длину l_i и осуществляется с вероятностью:

$$P_i = \prod_{j=1}^{m_i} P_{r_j} .$$

Введем понятие «сложность управления» как степень разнообразия последовательности операций управления при изменениях технологической среды. Повышение размерности среды, ее изменчивости и влияния на процесс управления приводит к росту числа узловых вершин, перераспределению вероятностей P_{ij} и увеличению разброса длин реализаций относительно математического ожидания:

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^n l_i P_i(l) .$$

Таким образом, сложность управления можно оценить дисперсией выборки $D(l)$ длины алгоритма, полученной в ходе наблюдений за действиями оператора в n рабочих циклах. В алгоритмическом смысле длину l_i характеризует число вершин в i -й реализации, а в технологическом — время i -го цикла

$$t_i = \sum_{k=1}^{q_i} \tau_k$$

или число q_i переключений исполнительных устройств за цикл. На практике удобнее использовать данные хронометражных наблюдений, исключив из t_i составляющие, обусловленные ошибками измерений и функциональными особенностями оператора. Анализ показал, что выбор критерия сложности в виде выборочной дисперсии $D_n(t)$, коэффициента вариации:

$$\delta = \frac{\sqrt{D_n(t)}}{t}$$

длины алгоритма, отношения числа вариантов длины алгоритма к числу элементов выборки не позволит

сравнивать процессы разной длины с разным объемом выборки.

Пусть в n рабочих циклах получена выборка времени t_1, t_2, \dots, t_n с дисперсией $D_n(t)$, состоящая из $m \leq n$ различных элементов t_1, t_{1+j}, \dots, t_m , причем набор элементов имеет дисперсию $D_m(t)$. Очевидно, что:

— для управления с изменением среды в каждом рабочем цикле $m = n$, $t = var$, $D_n(t) = D_m(t)$;

— чем больше вариантов времени в выборке, тем сложнее управление объектом.

Тогда критерий сложности можно представить в виде отношения

$$K_c = \frac{D_n(t)}{D_m(t)}.$$

Докажем свойства критерия сложности.

1. Для любого процесса $0 \leq K_c \leq 1$.

Исходя из определения K_c , докажем теорему: величина дисперсии $D_n(t)$ выборки случайных величин не превышает дисперсии $D_m(t)$ элементов выборки.

По определению дисперсии:

$$D_n(t) = \frac{(t_1 - \bar{t}_n)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_n)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_n)^2 n_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_{m-1}},$$

$$D_m(t) = \frac{(t_1 - \bar{t}_m)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_m)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_m)^2 n_m}{m-1}.$$

Заменив \bar{t}_n в первой формуле на \bar{t}_m , используем свойство минимальности дисперсии:

$$D_n(t) < \frac{(t_1 - \bar{t}_m)^2 n_1 + (t_2 - \bar{t}_m)^2 n_2 + \dots + (t_m - \bar{t}_m)^2 n_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m - 1}.$$

При $n_i = 1$, ($i = 1, \dots, n$) правая часть этого неравенства обращается в $D_m(t)$, следовательно, $D_n(t) < D_m(t)$.

Для предельно сложного процесса $t_n = t_m$ и $D_n(t) = D_m(t)$.

2. Ввод жесткой последовательности операций в начале или конце управления не меняет его сложности.

Заменим вершину A_1 на рис. 3.1 цепью вершин с постоянным временем выполнения T . Тогда для выборки $(t_1+T), (t_2+T), \dots, (t_n+T)$

$$K_c = \frac{D_n(t+T)}{D_m(t+T)} = \frac{D_n(t)}{D_m(t)}.$$

3. Сложность управления не зависит от размерности длины реализации алгоритма. При увеличении длины реализации в r раз для выборки $r \times t_1, r \times t_2, \dots, r \times t_n$

$$K_c = \frac{D_n(rt)}{D_m(rt)} = \frac{r^2 D_n(t)}{r^2 D_m(t)} = \frac{D_n(t)}{D_m(t)}.$$

Нормированная оценка степени изменчивости технологической среды через ее влияние на время цикла управления процессом позволит отобрать пригодные для роботизации операции и процессы, направленно изменить процесс с целью его подготовки к применению робототехники, выбрать тип управления роботом для конкретного процесса. Оценка K_c до и после изменения технологии процесса позволит выбрать эффективные варианты модернизации процесса, распределить функции между оператором и роботом [18].

3.3. ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.3.1. Структуры роботизированных технологических комплексов

Роботизированный технологический комплекс (РТК) — это автономно действующая совокупность технологического полуавтоматического оборудования, промышленного робота и вспомогательного оборудования, в которой обеспечивается автоматическое выполнение технологического процесса. Промышленный робот при механической обработке деталей используются для установки заготовок в рабочую зону станка и контроля их базирования, снятия готовых деталей со станка и их размещения в тару, передачи деталей от станка к станку, поворота деталей в процессе обработки, контроля размеров деталей, очистки поверхности детали, смены инструмента.

На базе одних и тех же моделей станков можно создавать различные компоновки РТК, применяя роботы с различными функциональными возможностями.

Структуры РТК (рис. 3.2) сводятся к трем типам компоновки.

1. Один робот — одна технологическая машина ТМ (рис. 3.2, а).

Такие структуры применяют в мелкосерийном производстве на операциях механообработки, холодной штамповки, сварки и окраски, если время операции не превышает нескольких секунд.

2. Один робот в центре — несколько технологических машин по окружности (рис. 3.2, б). Структуры применяют в серийном многооперационном производстве на операциях механообработки или сборки электровакуумных приборов с повышенной длительностью операций.

3. Линия роботов параллельна линии технологических машин (рис. 3.2, в).

Структуры такого типа применяют при большом разнообразии вариантов и операций технологического процесса, например при сборке коммутационных изделий и многооперационной штамповке.

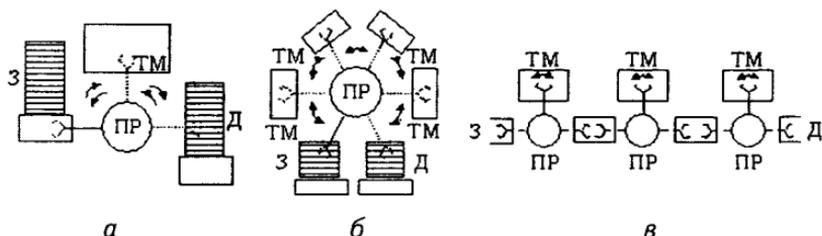


Рис. 3.2. Типовые компоновки роботизированных технологических комплексов: а — индивидуальная; б — круговая; в — линейная (ПР — промышленный робот; ТМ — технологическая машина; З — заготовки; Д — детали)

Линейные компоновки РТК (рис. 3.2, в) по сравнению с круговыми (рис. 3.2, б) позволяют в полтора раза уменьшить площадь РТК, увеличить число обслуживаемых станков с 2–3 до 5–6, обеспечить большую производительность и удобство обслуживания.

По способу установки на рабочем месте роботы делят на подвесные, напольные и встраиваемые в обслуживаемое оборудование. Рассмотрим приложения робототехники для обслуживания оборудования в некоторых отраслях.

3.3.2. Холодная листовая штамповка

Технология холодной листовой штамповки сводится к переносу плоской заготовки из накопителя заготовок на матрицу прессы, опусканию пуансона на матрицу, подъему пуансона, переносу продукта штампов-

ки в накопитель деталей. Отличающаяся многократным повторением однообразных движений «взять—положить—снять», холодная листовая штамповка стала первым объектом промышленного применения роботов.

Варианты компоновки РТК холодной штамповки (рис. 3.3) различаются размещением робота (1) относительно прессы (2), загрузочного устройства (вибробункера (3), магазин (4), податчик ленты (5), числом манипуляторов, способом съема изделия (пневмосдуд (6) или манипулятор). Основные требования к роботам: быстродействие, легкость переналадки, смена захватных устройств, точность позиционирования объекта. Обычно применяются простые пневматические роботы с цикловой системой управления и грузоподъемностью 0,8–10 кг.

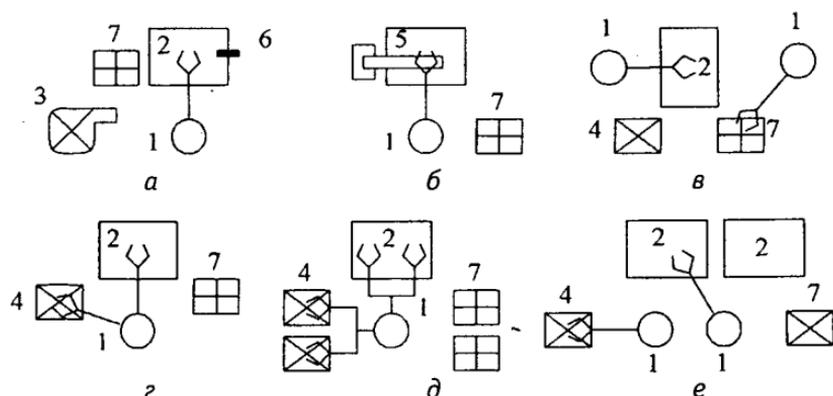


Рис. 3.3. Схемы применения роботов 1 при холодной листовой штамповке прессом 2:

- а — подача заготовок вибробункером 3;
- б — подача ленты 5, снятие в накопитель 7;
- в — загрузка одним роботом, разгрузка другим;
- г — загрузка-разгрузка двуруким роботом;
- д — загрузка-разгрузка двуруким роботом со спаренным захватным устройством;
- е — передача полуфабриката с прессы на пресс

3.3.2. Горячая объемная штамповка

Технологический процесс заключается в переносе раскаленной заготовки под молот и ее повороте перед ударами молотом. Для этого требуются одинаковое время переноса заготовки и возможность многооперационной обработки заготовки с изменением ее формы в рабочей зоне. Робот должен удерживать заготовку при ударах ковочного молота.

С позиции роботизации технология характеризуется необходимостью поддержания нагрева заготовки в процессе обработки, требующем минимального времени переноса заготовки из зоны нагрева под пресс, выполнением многопереходной обработки на одной машине, изменением формы изделия, ударами при обработке. Роботы должны обеспечивать высокую скорость перемещений, контроль температуры и фиксацию заготовки, иметь грузоподъемность 10–50 кг.

При молотовой ковке тяжелых деталей применяют манипуляторы с ручным управлением. Если на раскаленную заготовку ставится штамп изготовителя, то необходимы контроль освобождения штампа от детали, фиксации детали при ударе штампа, удаления отходов штамповки, блокировка прессы при захвате роботом более двух заготовок.

3.3.3. Обслуживание металлорежущих станков

Металлорежущие станки в составе РТК должны обеспечивать автоматизацию зажима, базирования и освобождения детали, удаления стружки, контроля параметров детали, смены инструмента, взаимосвязи систем управления станком и роботом. Доступ в рабочую зону станка должен быть безопасен для человека. При роботизации используют станки с числовым программным управлением или станки-полуавтоматы со временем обработки изделия более 3-х минут. Необходима технологическая оснастка, переналаживаемая на

изменение номенклатуры деталей. При обслуживании станка робот осуществляет установку ориентированных заготовок в рабочую зону станка, снятие деталей со станка и их укладку в магазин, выдачу команд управления оборудованием, транспортирование деталей между станками.

Наиболее эффективно применение роботизированных комплексов для механообработки втулок, дисков, зубчатых колес, фланцев, валов и рычагов, имеющих однородные поверхности для базирования и захвата.

В однопозиционных роботизированных комплексах автономный или встроенный робот обслуживает один станок. В многопозиционных или групповых комплексах робот производит загрузку и разгрузку нескольких станков, а также осуществляет транспортирование деталей между станками, их переориентацию и управление станками.

Сложились четыре типовые компоновки роботизированных комплексов механообработки (рис. 3.4).

1. Подвесные роботы (1) с прямоугольной системой координат загружают сверху или сбоку станки (2), расположенные в одну линию (рис. 3.4, а). Для подачи деталей в рабочую зону роботов используют шаговые конвейеры (3). Робот также устанавливает деталь на позицию контроля (4). Такие РТК применяют для автоматических линий при массовом или крупносерийном производстве.

2. Подвесной робот (1) обслуживает группу станков (2), перемещаясь вдоль линии станков (рис. 3.4, б). Заготовки подаются конвейером (3). Полуфабрикаты укладываются роботом в промежуточные накопители (5). Робот осуществляет смену инструмента и оснастки, удаление стружки, а также контроль размеров деталей в позиции (4).

3. Подвесной робот (1) движется между станками (2), загружая их маятниковым движением манипулятора (рис. 3.4, в). Шаговые конвейеры (3) для подачи заго-

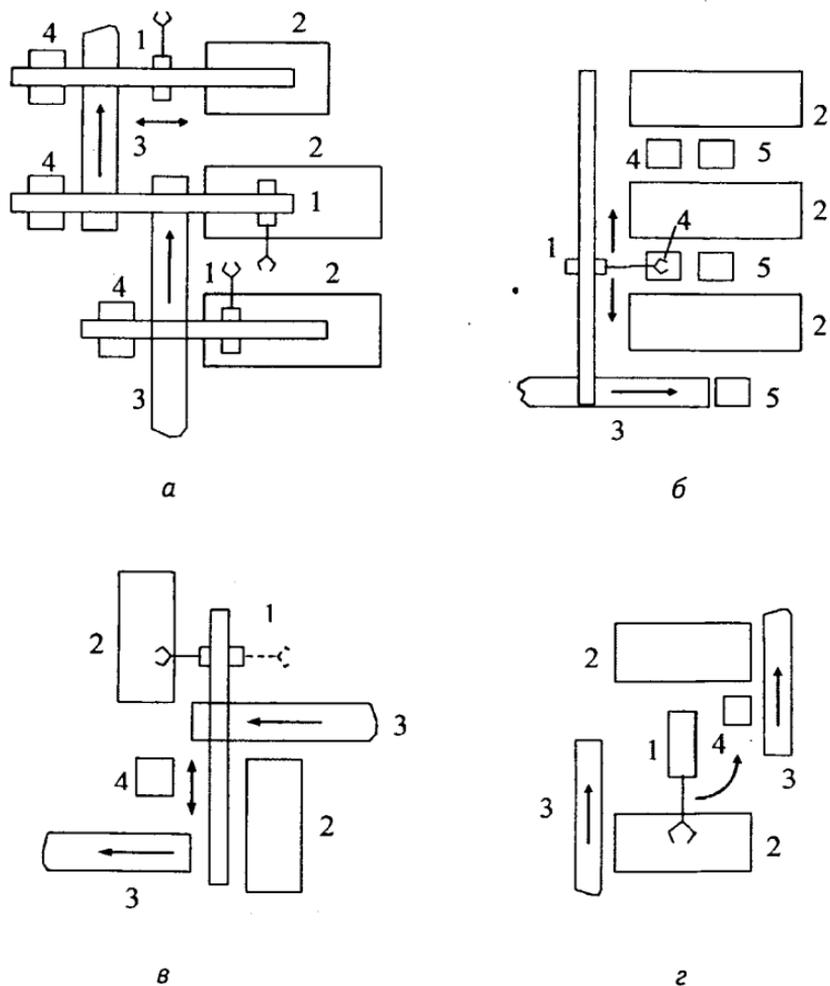


Рис. 3.4. Структуры роботизированных комплексов для обслуживания металлорежущих станков:
 1 — подвесной робот; 2 — станок; 3 — конвейер;
 4 — позиция контроля; 5 — промежуточный накопитель

товок и выдачи изделий установлены перпендикулярно линии движения робота.

4. Напольный робот (1) с цилиндрической системой координат обслуживает по кругу станки (2) и конвейеры (3) для подачи заготовок и выдачи изделий (рис. 3.4, з).

Точность обработки может быть повышена за счет ввода дополнительных степеней подвижности в конструкцию станка [11]. Специально разработанный комплекс из токарного или фрезерного станка с числовым программным управлением, автоматизированными загрузкой-разгрузкой, сменой инструмента, контролем размеров детали называется *обрабатывающим центром*. Загрузка-разгрузка изделий и смена инструмента осуществляются встроенным роботом.

3.3.4. Обслуживание ванн гальванопокрытий

Процесс нанесения гальванических покрытий представляет собой последовательное выдерживание подвесок с деталями в ваннах никелирования, хромирования, цинкования, кадмирования, меднения, анодирования и пр. В существующей технологии рабочий поочередно опускает подвески с деталями в подогреваемые ванны с растворами. Применение роботов для выполнения этих

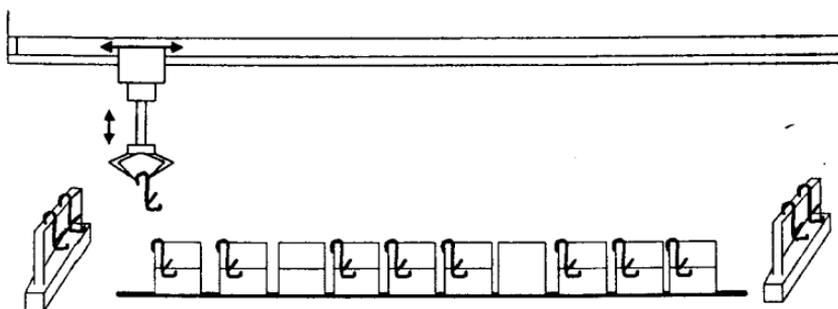


Рис. 3.5. Применение роботов для обслуживания линии гальванопокрытий

операций позволит освободить рабочих от вредного для здоровья труда во влажной атмосфере, насыщенной испарениями растворов. Промышленные роботы осуществляют установку, снятие и перенос подвесок с деталями из ванны в ванну (рис. 3.5).

Для этого применяются:

— универсальные роботы, установленные стационарно или на подвижной рельсовой тележке, перемещающейся вдоль ванн;

— подвесные транспортные роботы на монорельсе;

— специализированные роботы в составе автоматических линий гальванопокрытий.

Промышленный робот по программе захватывает подвеску с деталями из гнезд магазина перемещает и опускает ее в ванны с растворами. В системе управления роботом программируются последовательность обслуживания ванн и время выдержки подвески в каждой ванне. Скорость опускания подвески в ванну ограничивается необходимостью смягчения удара ограничителя спуска о края ванны и устойчивостью подвески деталей, а скорость подъема — временем стекания остатков раствора с деталей.

Универсальные роботы применяются для отдельных деталей, гальванообработка которых требует поворотов и перемещений. Обычно используют подвесных роботов, обеспечивающих компактность линии, свободный доступ к ваннам, снижение металлоемкости. В автоматических линиях над ваннами подвешивают монорельс, по которому движутся роботы или же на бортах ванны устанавливают рельсовый путь, по которому движется робот. Грузоподъемность робота составляет до 5000 Н; число позиций обслуживания — до 18; число степеней подвижности — 2, погрешность позиционирования — 50 мм; скорость перемещения — 15 м/мин, скорость подъема или опускания — 30 м/мин. В качестве захватного устройства обычно используют крюк и применяют цикловое управление роботом.

3.3.5. Литейное производство.

Литейное производство заключается в том, что сначала утрамбовывают наполнитель, в который помещена деталь. Затем деталь извлекают из пресс-формы и в образовавшуюся пустоту заливают жидкий металл. После его застывания отливку извлекают из пресс-формы.

Роботов применяют для очистки пресс-формы струей сжатого воздуха и нанесения на ее поверхность смазочного материала с программируемой интенсивностью. Стабилизация времени нанесения смазки позволяет поддерживать заданный нагрев пресс-формы.

Применение роботов для автоматизации заливки металла в пресс-форму повышает точность дозирования и стабилизирует процесс заливки. Манипулятор-заливщик совершает качающиеся движения захватного устройства с ковшом от тигля с расплавленным металлом к заливочному окну пресс-формы и обратно.

Роботы, работающие в цилиндрической системе координат, применяются для извлечения неостывших, хрупких или крупногабаритных отливок из пресс-формы. После извлечения отливки роботы могут подавать ее в камеру охлаждения или под пресс для обрубки литника — застывшего канала, по которому подавался жидкий металл. На других участках литейного производства роботы выполняют операции по шлифованию поверхности отливки с помощью дробеструйного пистолета или абразивного инструмента, переносу форм и отливок.

Кроме рассмотренных примеров, в машиностроении применяют роботы для сортировки заготовок и деталей, укладки кабеля, загрузки-разгрузки термопечей.

Число станков n , обслуживаемых одним роботом, выбирают с учетом времени T обработки заготовки и времени t обслуживания одного станка:

$$n < \frac{T}{t} + 1$$

Вероятность обслуживания роботом i -го станка при равномерно распределенном времени обработки деталей T_i :

$$P_i = \frac{t_i}{T_i + t_i}$$

Коэффициент использования робота при обслуживании n единиц оборудования:

$$K_n = \frac{1}{(T/t + 1)(1 + P_n/n)},$$

где P — вероятность суммарных простоев участка.

3.4. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Вспомогательное оборудование роботизированного технологического комплекса разрабатывают для обеспечения работы роботов первого поколения, неспособных адаптироваться к среде. Оборудование необходимо для накопления определенного числа заготовок на исходной позиции роботизированного технологического комплекса, ориентации и поштучной подачи заготовок в позицию их захвата манипулятором, транспортировки одинаково ориентированных объектов внутри роботизированного технологического комплекса. К вспомогательному оборудованию относятся накопители для хранения заготовок, питатели для подачи заготовок в позицию захвата, ориентирующие устройства для одинакового позиционирования заготовок в позиции захвата манипулятором, фиксаторы и направляющие устройства.

Накопители изготавливают в виде кассет (рис. 3.6, *а*), многорядных магазинов (рис. 3.6, *б*), цепных устройств (рис. 3.6, *в*). В качестве питателя часто применяют шаговый конвейер. В отличие от непрерывного конвейера шаговый конвейер подает деталь в позицию захвата через заданный интервал времени.

Накопитель-питатель представляет собой лоток с подачей заготовок под действием собственного веса (рис. 3.7, *а*), бункер с подачей деталей путем вращения дна (рис. 3.7, *б*), поддон с шаговым поворотом (рис. 3.7, *в*), накопительный магазин (рис. 3.7, *г*). Распространенным накопителем-питателем является вибробункер со спиральным лотком внутри воронкообразной поверхности. При вибрации лотка детали опускаются в позицию захвата роботом.

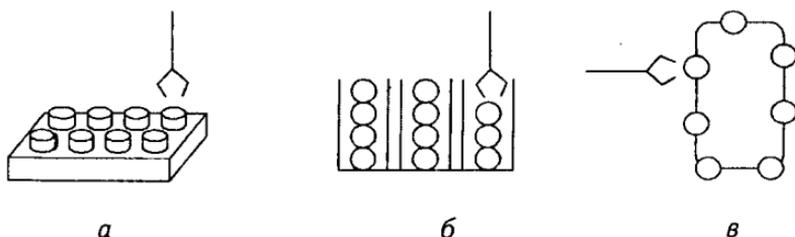


Рис. 3.6. Схемы накопителей: *а* — кассета; *б* — многорядный магазин; *в* — цепной накопитель

Ориентирующие устройства могут быть пассивными или активными. При пассивной ориентации деталь принимает заданное положение, двигаясь по лотку со специально подобранной формой. Центр тяжести детали, не принявшей заданное положение, находится вне лотка, поэтому в процессе движения она сбрасывается, как показано на рис. 3.8. В активных ориентирующих устройствах деталь поворачивают в нужное положение электромагнитным или пневматическим приводом.

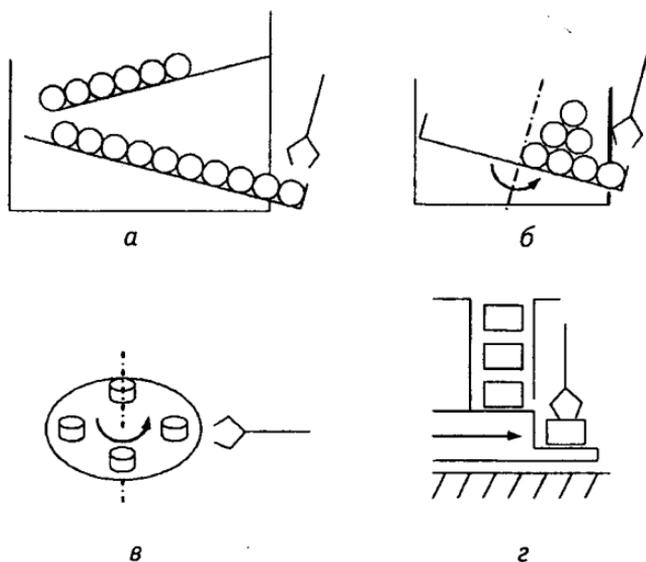


Рис. 3.7. Схемы накопителей-питателей: *а* — лоток, *б* — бункер, *в* — поддон, *г* — накопительный магазин

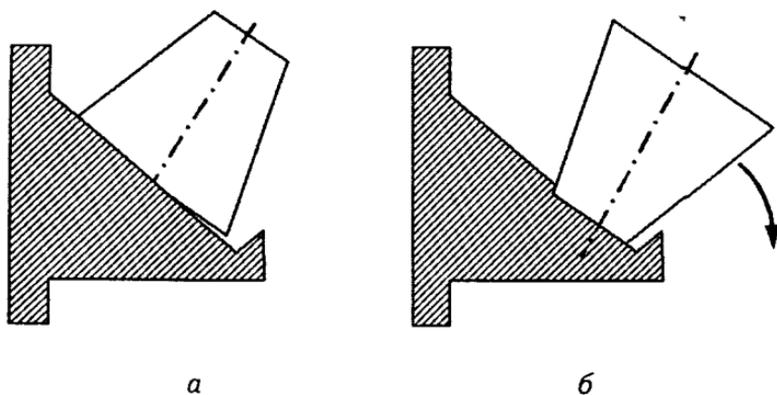


Рис. 3.8. Движение правильно (*а*) и неправильно (*б*) ориентированных деталей

Часто положение заготовки на рабочем столе распознают с помощью встроенных в него фотоэлементов, а после захвата заготовки формируют сигнал ее поворота роботом в нужное положение (рис. 3.9).

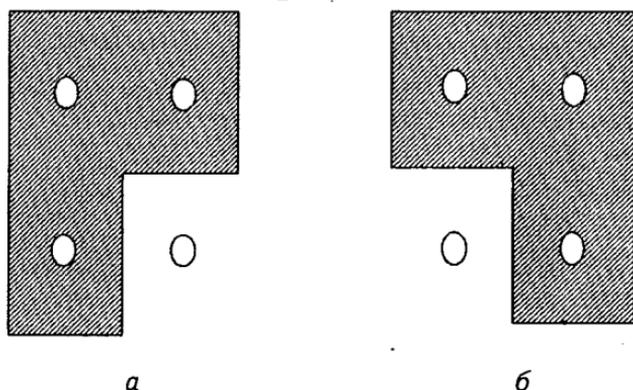


Рис. 3.9. Применение фотоэлементов для распознавания положения плоского объекта на рабочем столе :
а — правильное; *б* — неправильное

В человеко-машинных робототехнических системах часто используют поворотный стол (рис. 3.10), на одной стороне которого оператор укладывает детали, поступающие с конвейера. После поворота стола робот собирает из деталей изделие.

При роботизации сборки применяют специальные механизмы подачи, накопители, направляющие, установочные приспособления и фиксаторы для таких операций как крепеж, пайка, склейка.

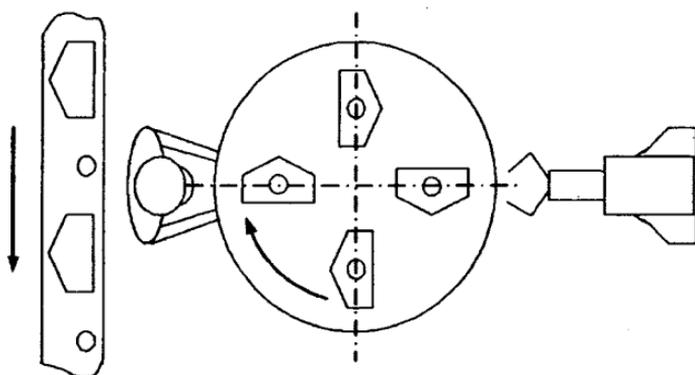


Рис. 3.10. Применение поворотного стола

3.5. ВЫПОЛНЕНИЕ РОБОТАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Наиболее эффективным применением робототехники становится выполнение основных операций по обработке деталей. Если рабочий орган вспомогательного робота представляет собой захватное устройство, то рабочий орган технологического робота выполнен в виде сварочного пистолета, режущего инструмента, окрасочного пистолета, насадки для напыления и т.п. Возможность точного ведения рабочего органа по заданной траектории позволяет применять роботов для точечной и дуговой сварки, окраски, прогрессивных способов резания материалов с помощью тонкой водяной струи высокого давления, луча лазера или струи плазмы. Многие из этих способов не могли быть реализованы человеком из-за вредных условий, невозможности визуального контроля, неточного перемещения инструмента.

3.5.1. Сварка

В зависимости от толщины свариваемых материалов применяют точечную или дуговую сварку.

При точечной сварке рабочий орган робота в виде сварочных клещей движется вдоль линии соединения листов толщиной до 3 мм. Через заданный шаг перемещения (20–200 мм) рабочий орган останавливается, подается команда на сжатие клещей и подачу через них тока. В точке соединения клещей листы свариваются. Затем клещи разжимаются и рабочий орган перемещается к следующей точке сварки. За счет более точного шага повышается качество сварки. Такие роботы нашли широкое применение при сварке кузовов автомобилей.

Дуговая сварка включает операции возбуждения и поддержания дугового разряда, перемещения электрода под заданным углом к оси свариваемых кромок и на определенном расстоянии от поверхности объекта с адаптацией к уменьшению длины электрода в процессе сварки. Сварочные роботы могут вести дуговую сварку со скоростью до 0,5 м/с при погрешности отработки траектории шва до 0,5 мм. Робот должен иметь не менее 5 степеней подвижности. Поскольку погрешность позиционирования объекта сварки на порядок больше погрешности отработки траектории перемещения электрода, то необходима адаптация к траектории шва.

Система роботизированной сварки может быть однопроходной, двухпроходной или комбинированной. В однопроходных системах сварки ведение электрода по заданной траектории осуществляется с помощью ультразвуковых, токовихревых или лазерных локационных датчиков, измеряющих расстояние до свариваемых поверхностей. В двухпроходных системах при первом проходе перемещают электрод без сварки вдоль шва и записывают изменения положения звеньев сварочного робота в память управляющего устройства.

При втором проходе осуществляют непосредственно сварку по записанной при первом проходе траектории.

В комбинированной системе оператор сначала проводит электрод по заданной траектории. Система записывает расстояния L_1 и L_2 от электрода до свариваемых поверхностей (рис. 3.11). В процессе сварки робот ведет электрод по шву, сопоставляя фактические расстояния до свариваемых поверхностей с заданными.

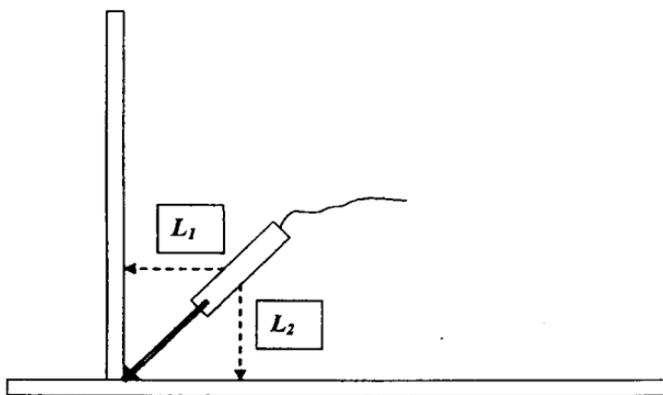


Рис. 3.11. Движение сварочного электрода при обучении

3.5.2. Окраска

Существуют методы окраски объекта путем его окунания в ванну, струйного облива, электроосаждения или распыления. Ручная окраска трудоемка, требует специальных мер защиты и повышенного расхода окрасочных материалов, невозможна в труднодоступных местах.

При окраске окунанием в ванну используют манипулятор с цикловым управлением. Для струйного облива применяют манипулятор с позиционным управлением. Метод окраски электроосаждением заключается в том, что краскораспылитель и окрашиваемую

поверхность соединяют с разными полюсами источника постоянного напряжения. За счет проводимости мелкодисперсного потока краски между краскораспылителем и окрашиваемой поверхностью достигается лучшее качество нанесения покрытия. В этой технологии манипулятор с контурным управлением перемещает краскораспылитель перед окрашиваемой поверхностью.

Для роботизированной окраски чаще всего применяют метод распыления. Сначала оператор рукой ведет распылитель манипулятора по неокрашенной поверхности, а система управления записывает изменения координат звеньев. Затем робот повторяет записанную траекторию с подачей в распылитель окрасочного материала. Программа перемещений распылителя, записанная в устройство управления, задается формой окрашиваемой поверхности. Окрасочный робот перемещает краскораспылитель с большой скоростью на оптимальном расстоянии от поверхности детали. При изменении формы детали меняется программа окраски. За счет стабилизации расстояния до детали, согласования скорости перемещения распылителя с интенсивностью и площадью распыления повышается качество окраски, а расход окрасочных материалов снижается на 20–30%. Окраску можно вести в процессе движения детали. При окраске с помощью робота не требуются вентиляция, вытяжка и поддержание нормальной температуры.

Вследствие поддержания заданного расстояния до окрашиваемой поверхности и согласования скорости перемещения распылителя с интенсивностью и площадью распыления повышается качество окраски и достигается значительная экономия окрасочных материалов. Особенно эффективна роботизация двухсторонней многоэтапной окраски в процессе движения крупных изделий сложной формы. В роботизированной линии окраски кузовов автомобилей (рис. 3.12)

программа и цвет окраски меняются в зависимости от заказа, заданного датчиком (1) распознавания номера кузова (2). Роботы (3, 4) наносят грунтовку, роботы (5, 6) осушают поверхность струей горячего воздуха, роботы (7, 8) наносят лакокрасочное покрытие, роботы (9, 10) выявляют и устраняют дефекты окраски.

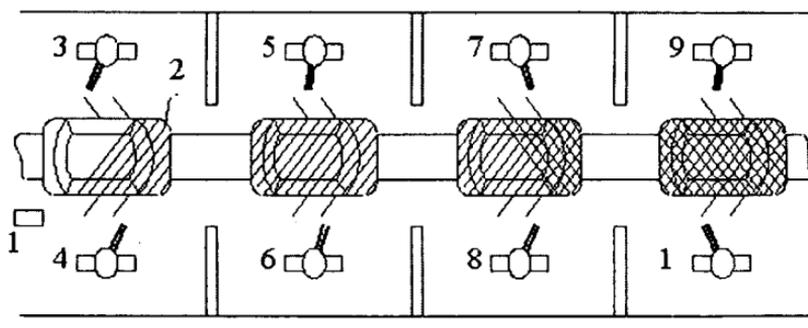


Рис. 3.12. Роботизированная линия окраски кузовов автомобилей

3.5.3. Резание материалов

Программирование сложных траекторий резки материалов рабочим органом робота не требует наблюдения оператора за перемещением режущего органа. Это позволяет применять нетрадиционные способы резки тонкими струями высокого давления, лазерным лучом и потоком плазмы. Применение таких технологий позволяет повысить скорость, точность и качество резания, сократить расход сырья и износ инструмента.

Рабочий орган робота для резания тонкой струей высокого давления оснащают сапфировым насадком с диаметром выходного отверстия до 0,4 мм. Через него подают воду под давлением до 400 МПа. Струя высокого давления приобретает новые свойства, позволяющие, например, разрезать пластину алюминия толщи-

ной до 20 мм со скоростью до 3 м/с при ширине разреза 1,5 мм. Скорость водяной струи достигает тысячи метров в секунду. Расстояние от насадка до материала составляет 10–100 мм. Сила реакции при ударе струи о материал не превышает 40 Н. Для повышения режущих способностей струи в нее добавляют мелкодисперсный порошок кварца или гранита. Это позволяет резать листовую сталь толщиной до 7,5 мм со скоростью 0,4 м/мин или титан толщиной 1,75 мм со скоростью 0,3 м/мин.

Лазерная резка основана на локальном нагреве материала лучом лазера диаметром до 0,13 мм с плотностью энергии до 109 Вт/см. Лазер мощностью 600 Вт установлен стационарно, а его луч подводится к рабочему органу манипулятора через световод. При мощности лазера 1200 Вт возможна резка стального листа толщиной до 12 мм с шириной разреза 0,2 мм, дерева — до 30 мм, синтетических материалов — до 40 мм, титана — до 2,4 мм. При резании мелких деталей робот перемещает захватное устройство с деталью перед стационарным лазером.

Плазменная резка отличается от традиционной газовой резки наличием высокотемпературной дуги из ионизированного газа, под действием которой плавится металл. Ионизированный газ представляет собой струю раскаленного газа, к которой подводят электрическое напряжение величиной 170–190 В. Сила тока, протекающего через струю, составляет 150–220 А. Рабочий орган робота представляет собой горелку, обдуваемую защитным газом. Плазменную резку применяют для металлических листов толщиной до 65 мм. Для резки мелких заготовок робот перемещает деталь перед стационарным режущим органом со скоростью до 1,5 м/мин.

Для высокоскоростного резания листов по программируемой траектории применяют манипуляторы с контурным управлением в прямоугольной системе координат.

нат. Рабочий орган перемещается над горизонтальной поверхностью, на которую укладывают разрезаемый лист. Грузоподъемность робота не превышает 50 кг, погрешность позиционирования при скорости перемещения рабочего органа 0,1 м/с составляет 0,2 мм.

3.5.4. Абразивная зачистка поверхностей

Применение роботов для удаления выступов отливок, снятия заусенцев, очистки поверхности, шлифования и полирования повышает производительность труда в 1,5–2,5 раза. В качестве рабочего органа применяют ленточные пилы, шлифовальные круги, фрезы, отбойные молотки или пескоструйные насадки. Зоны зачистки задают одним из способов:

- обход всей поверхности по заданной программе;
- окрашивание человеком площадок, требующих разных режимов зачистки с последующим наведением рабочего органа на площадки заданного цвета;
- автоматическое слежение за отклонением от правильных размеров детали;
- сравнение детали с эталоном, заданным системой технического зрения.

Наведение рабочего органа на участки заготовки для зачистки зависит от размера заготовки. При малых размерах заготовки робот перемещает ее относительно рабочего органа зачистки. Для крупных заготовок рабочий орган зачистки перемещают относительно неподвижной заготовки. Для повышения производительности при зачистке средних заготовок осуществляют одновременные перемещения заготовки и рабочего органа зачистки.

Робот для абразивной зачистки должен иметь повышенную жесткость звеньев манипулятора, датчик силы контакта рабочего органа и заготовки, противопылевую защиту. Во избежание разрушения рабочего органа резонансная частота манипулятора должна

выбираться за пределами полосы частот вибрации, возникающей в процессе зачистки.

3.6. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА

Массовый выпуск комплектующих может быть организован на автоматических линиях без применения роботов. Однако процесс сборки из комплектующих готового к продаже изделия сложно автоматизировать вследствие разнообразия изделий и операций сборки. Сборочными операциями в промышленном производстве занято около 40% рабочих.

Объекты сборки принято делить на две группы: «вал» и «корпус». В объектах типа «вал» на некоторый вал надевают подшипники, зубчатые колеса, втулки, манжеты и пр. В объектах типа «корпус» детали вкладывают в корпус.

Большинство сборочных операций сводятся к операции ввода вала в отверстие, например при сборке часов, установке колес на автомобиль, монтаже шестеренчатого насоса. Погрешность позиционирования захватного устройства робота в десятки раз больше зазора между валом и отверстием, часто не превышающего 10 микрон. Поскольку уменьшение погрешности позиционирования звеньев манипулятора достигло своего технического предела, приходится решать эту задачу путем адаптивного управления движением захватного устройства, оснащенного силомоментным датчиком. Операцию ввода вала в отверстие делят на четыре этапа, каждый из которых требует собственной программы управления (рис. 3.13).

Сначала отыскивают поверхность детали, фиксируя появление усилия в захватном устройстве в момент касания валом поверхности (рис. 3.13, а). Затем перемещают захватное устройство по концентрической

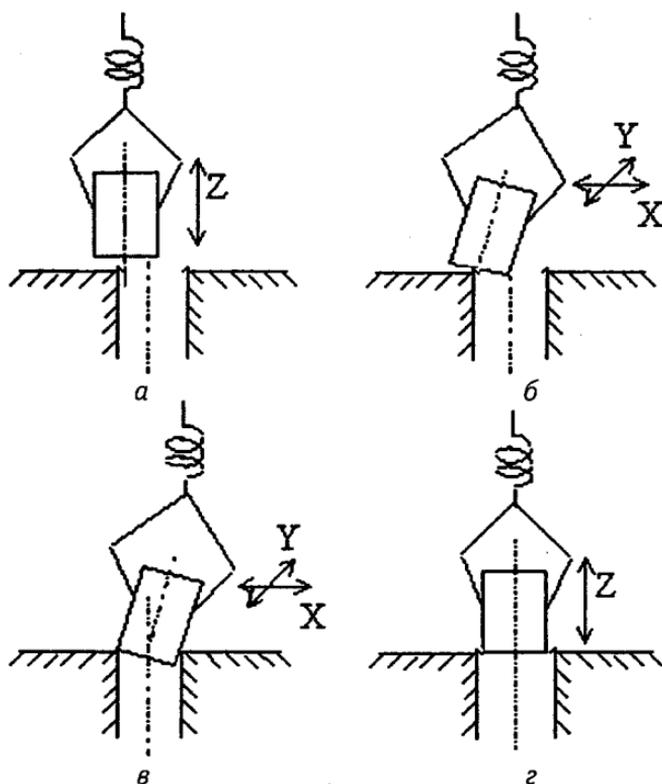


Рис. 3.13. Разделение операции ввода вала в отверстие на этапы: *а* — касание валом поверхности детали; *б* — поиск отверстия на поверхности путем круговых движений захватного устройства; *в* — локализация отверстия; *г* — совмещение осей вала и отверстия

траектории до тех пор, пока вал не попадет в отверстие (рис. 3.13, б). На третьем этапе уменьшают радиус кругообразных движений захватного устройства, пока вал не коснется противоположных сторон отверстия (рис. 3.13, в). На заключительном этапе поворачивают вал до совмещения его оси и оси отверстия, что фиксируется выравниванием усилий по осям X, Y, Z (рис. 3.13, г). После совмещения осей можно вво-

дить вал в отверстие. Окончание каждого этапа распознают по изменению усилий в захватном устройстве. На следующем этапе меняют направление движения захватного устройства.

Сборочные роботы обычно имеют компоновку «SCARA», скорость звеньев до 1,5 м/с, автоматическую смену захватных устройств и инструментов. Для сборочных операций компонуют роботизированный сборочный комплекс, содержащий один или несколько роботов, которые забирают детали из накопителей, меняют инструмент в рабочем органе, собирают изделие на монтажном столе, контролируют правильность сборки и переносят изделие на следующий участок. При этом возникают задачи распознавания объектов манипулирования и предотвращения столкновений звеньев одновременно работающих роботов.

Шаговый конвейер, вдоль которого установлены сборочные роботы R_1, \dots, R_5 называют *роботизированной сборочной линией* (рис. 3.14).

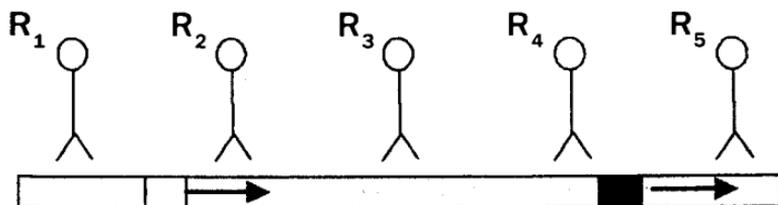


Рис. 3.14. Роботизированная сборочная линия с пятью роботами

Для обеспечения работоспособности линии при отказе одного из роботов оставшиеся роботы меняют свои программы (кооперативное поведение) или же в линию вводится резервный робот (редундантное поведение) [19].

Сборочный комплекс с 1–2 роботами применяют при сборке изделий из 6–12 деталей при объеме выпуска 20–100 тысяч изделий в год. Роботизированные сборочные комплексы, связанные друг с другом гибкой транспортной связью в виде автоматических тележек, образуют роботизированное сборочное производство.

3.7. ГИБКАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СИСТЕМА

Гибкая производственная система (ГПС) представляет собой совокупность оборудования с числовым программным управлением, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных технологических машин и систем их автоматического функционирования, которая может автоматически переналаживаться на выпуск изделий произвольной номенклатуры в пределах своих возможностей.

Основой ГПС являются роботизированные технологические участки с изменяемыми транспортными связями [20]. Каждая единица оборудования ГПС, включая манипуляционных и транспортных роботов, оснащена системой числового программного управления (*NC-Numerical Control*). Программу вводят для каждого изделия в заказанной партии (*NC — Numerical Control*), считывают перед изготовлением партии изделия (*SNC-Stored Numerical Control*), рассчитывают перемещения рабочих органов для принятой извне программы (*CNC-Computer Numerical Control*), принимают программу извне (*DNC— Direct Numerical Control*), набирают на встроенном в единицу оборудования пульте (*HNC-Handled Numerical Control*). Для управления оборудованием ГПС, как правило, применяют системы CNC.

Структура ГПС зависит от взаимного размещения технологических машин с программным управлением (1),

автоматизированного склада (2) и маршрутов движения транспортных роботов (3) (рис. 3.15).

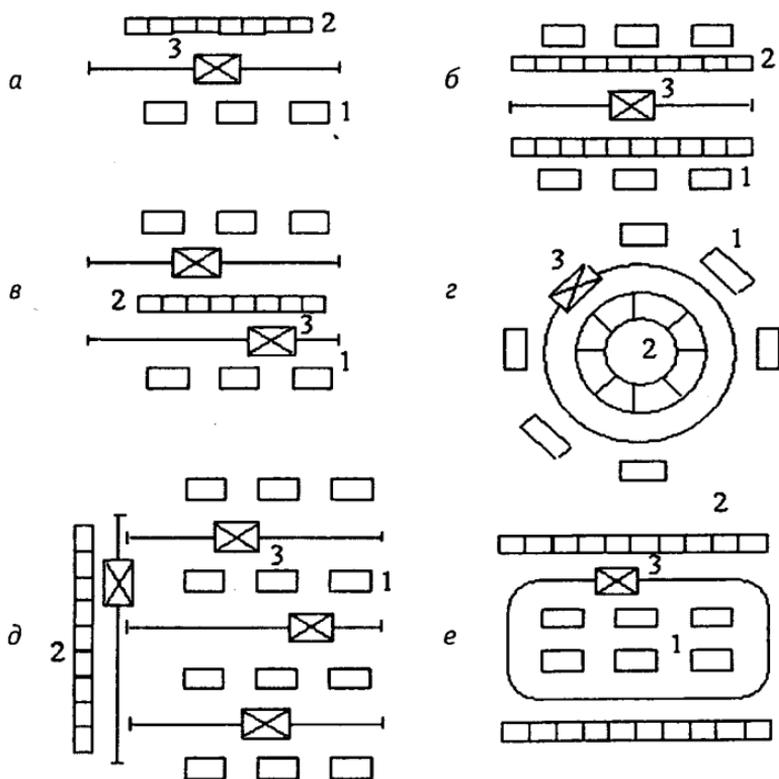


Рис. 3.15. Компонировочные структуры ГПС

(1 — технологическая машина ; 2 — автоматизированный склад; 3 — транспортный робот) : а — с однорядным расположением единиц оборудования и внешним складом; б — с двухрядным расположением единиц оборудования и внутренним складом; в — с параллельной работой транспортных роботов; г — с круговым обслуживанием; д — с последовательной работой транспортных роботов; е — с круговым обслуживанием и многорядным расположением складов

Одна и та же структура ГПС может иметь разные варианты взаимодействия единиц оборудования во времени и пространстве. Для выбора варианта следует провести имитационные эксперименты, представив ГПС в виде системы массового обслуживания или сети Петри [21].

3.8. РОБОТОТЕХНИКА ДЛЯ НЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЕЙ

Машиностроение стало первым и основным потребителем средств робототехники, поскольку роботы сами по себе являются продуктами машиностроительного производства. На первом этапе в машиностроении были решены задачи обслуживания роботами технологического оборудования. Затем стали создавать гибкие производственные системы для мелкосерийного производства и применять технологических роботов для резки, сварки, окраски и сборки.

Постепенно идеи робототехники стали проникать в другие отрасли, такие как добыча полезных ископаемых, металлургия, военное дело, сельское хозяйство, подводные работы, микроэлектроника, космос, легкая промышленность и т.п.

Сначала казалось, что для решения отраслевых проблем можно будет применять тех же роботов, что применяются в машиностроении. Однако анализ процессов с позиции роботизации показал, что роботы из машиностроения могут быть перенесены только для 20% технологических процессов [22]. Остальные процессы требуют создания отраслевых средств робототехники. Это объясняется перемещениями рабочих мест в пространстве и специальными требованиями к технологическим процессам. Разработка мобильных роботов с автономной навигацией и элементами искусственного интел-

лекта является сейчас передовым направлением развития робототехники. Их применение позволит работать в недоступных для человека местах, например вести добычу полезных ископаемых на других планетах.

Рассмотрим некоторые приложения робототехники в немашиностроительных отраслях.

3.8.1. Горное дело

Больше половины подземных рабочих занято тяжелым физическим трудом, доля которого увеличивается по мере ухудшения условий добычи [10]. Растут уровни травматизма и профзаболеваний, выплаты для компенсации экстремальных условий труда. Традиционная механизация имеет ограниченное применение и неспособна остановить рост трудоемкости добычи. Предстоящий переход к добыче полезных ископаемых на большой глубине сделает работу горнорабочих невозможной из-за нагрева выработок теплом Земли, изменения свойств горных пород, значительных потерь времени на доставку людей к месту работы и обратно.

Целями применения робототехники в горном деле являются ведение работ в опасных для человека условиях, выемка трудноизвлекаемых запасов, переход к добыче без постоянного присутствия людей под землей.

В Канаде, Великобритании, Австралии и других странах приняты национальные программы по созданию робототехники для подземных работ. На крупных рудниках Швеции, Канады, ЮАР, Чили применяют системы управления подземными машинами с поверхности. Аудио-, видео- и цифровая информация с мест работы через информационную сеть передается на поверхность (рис. 3.16). Наблюдая через бортовые телекамеры за поведением машин, операторы передают команды управления из имитаторов кабин на поверхности. Имитационное моделирование технологии в виде системы массового обслуживания показало, что

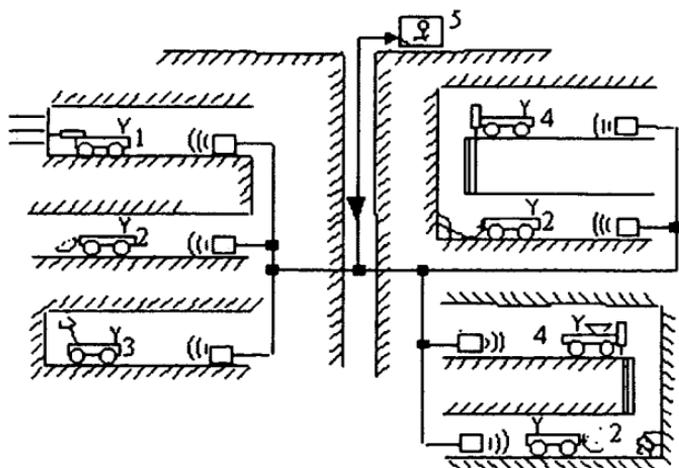


Рис. 3.16. Управление подземными машинами с поверхности: 1 — бурильная машина; 2 — погрузочно-транспортная машина; 3 — набрызг-бетонная машина; 4 — зарядная машина; 5 — кабина оператора

при реализации автоматического движения погрузочно-транспортной машины по выработке один оператор может управлять 3–4 машинами [23].

При добыче полезных ископаемых открытым способом могут быть применены самоходные манипуляторы с гидроударниками для дробления крупных кусков породы, ковшовые погрузчики с дистанционным управлением зачерпыванием и автоматическим движением между пунктами погрузки и разгрузки, самоходный укладчик кабеля для бурового станка и экскаватора, робот для доставки взрывчатых веществ и зарядания скважин.

Для проведения подземных выработок предлагается разработать: буровой робот для бурения шпуров по программируемой разметке забоя; навесной манипулятор для монтажа и демонтажа штанг бурового става; навесной манипулятор для бурения шпуров и установки

анкеров в призабойной зоне; автоматический манипулятор с позиционным управлением для нанесения набрызг-бетонной смеси на стенки выработки; навесной манипулятор, оконтуривающий заданный профиль выработки высоконапорной тонкой струей воды перед выемкой по сечению выработки; робокары для доставки грузов по низким выработкам и вывоза горной массы [24]. На рис. 3.17 представлены некоторые схемы применения робототехники при проведении выработок.

В существующей технологии проведения выработки комбайновым способом (рис. 3.17, а) используют проходческий комбайн избирательного действия (1) с перегружателем горной массы на конвейер (2). Элементы крепи доставляют с помощью монорельсовой дороги (3). В роботизированной технологии (рис. 3.17, б) на комбайн устанавливают автоматический манипулятор (4) для нанесения набрызг-бетонной крепи. Вместо конвейера и монорельсовой дороги вводят самоходный вагон (5) для вывоза горной массы и доставки материалов в забой. Крепь устанавливают роботом-анкероустановщиком с двумя манипуляторами (рис. 3.17, в). Первый манипулятор (7) наводит тонкоструйный насадок для бурения шпуров под анкера, а второй манипулятор (8) захватывает трубчатый анкер, вводит его в шпур и распирает подачей воды под давлением. Перед работой комбайна первый манипулятор также обрабатывает контур забоя струей высокого давления по заданной траектории на глубину 0,3–0,4 м. Последующая обработка забоя режущим рабочим органом позволяет сохранить заданный контур выработки и исключить трудоемкие работы по заполнению пустот между рамой крепи и выработкой.

В технологии проведения выработки буровзрывным способом (рис. 3.17, г) используют самоходную погрузочную машину (9), бурильную установку (10) и конвейер (2). С помощью погрузочной машины ведут доставку и погрузку горной массы на конвейер, зачистку почвы выработки, доставку элементов крепи.

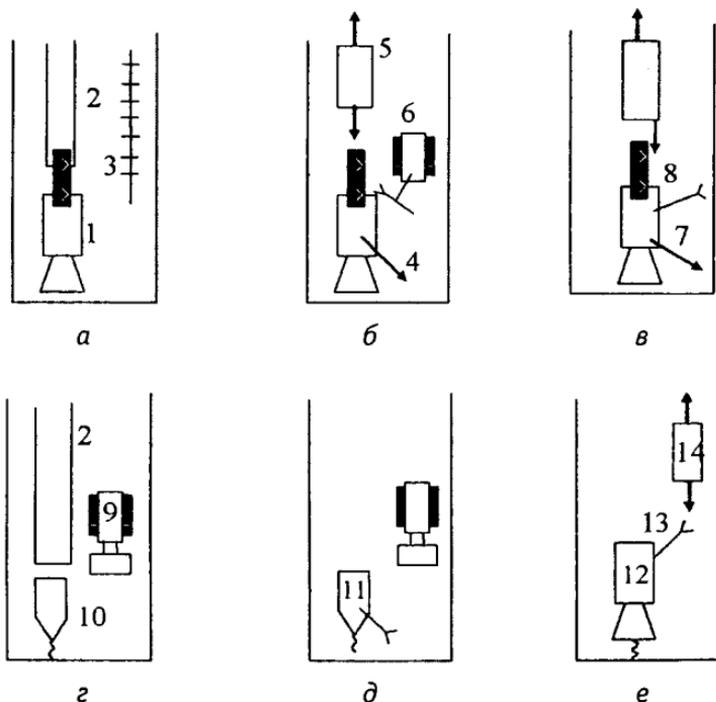


Рис. 3.17. Схемы применения робототехники при проведении выработки (1 — комбайн; 2 — конвейер; 3 — монорельсовая дорога; 4 — манипулятор для набрызг-бетонирования; 5 — самоходный вагон; 6 — робот-крепеподъемник; 7 — манипулятор с тонкоструйным насадком; 8 — манипулятор для установки анкеров; 9 — самоходная погрузочная машина; 10 — бурильная установка; 11 — бурильный робот с анкероустановщиком; 12 — буропогрузочная машина; 13 — манипулятор-крепеподъемник; 14 — транспортный робот):
а — традиционный комбайновый способ; *б* — роботы доставляют крепь и ведут набрызг-бетонирование;
в — роботы ведут установку анкерной крепи;
г — традиционный буровзрывной способ; *д* — робот доставляет крепь и вывозит горную массу; *е* — робот для крепления установлен на буропогрузочной машине

При роботизации вместо бурильной установки вводят мобильный бурильный робот с навесным автоматическим анкероустановщиком (11) (рис. 3.17, *д*). Робот осуществляет забуривание, возврат штанги, защиту от заклинивания, перемещение бурильной головки, бурение шпуров по заданной программе. Доставку материалов и вывоз горной массы ведет погрузочная машина с автоматическим управлением погрузкой, движением и разгрузкой. В другом варианте (рис. 3.17, *е*) на буропогрузочной машине (11) устанавливают манипулятор для установки крепи. Как и в предыдущей технологии, доставку материалов и вывоз горной массы ведет погрузочная машина с автоматическим управлением.

Для комбайновой выемки угля перспективна роботизация передвижки механизированной крепи к забою (рис. 3.18). В существующей технологии каждую секцию крепи оснащают встроенным устройством автоматического управления гидроцилиндрами распора и движения к забою (рис. 3.18, *а*). Вместо этого можно применить манипуляционного робота-крепепередвижчика (Р), который движется за комбайном (рис. 3.18, *б*). Робот останавливается перед секцией крепи, отыскивает рукоятку гидрораспределителя секции, захватывает ее и последовательно переводит в положения снятия распора, подтягивания секции к конвейеру и распора. Оператор из безопасного места наблюдает за процессом передвижки. Он может изменять расстояние между роботом и комбайном или устранять отказы секции. По окончании передвижки секции робот перемещается к следующей секции, используя в качестве направляющей став конвейера, специальную линию или корпуса гидрораспределителей секций. Возможно автономное перемещение робота в свободном проходе. Расстояние перемещения секции можно измерять по датчикам положения звеньев манипулятора.

В другом варианте (рис. 3.18, *в*) робот-крепепередвижчик оснащают инфракрасным передатчиком ко-

манд на приемник секции, соединенный с электрогидрораспределителями гидроцилиндров. Расстояние до комбайна регулируется с помощью бортового дальномера. Робот останавливается перед секцией и передает серию команд приемнику секции.

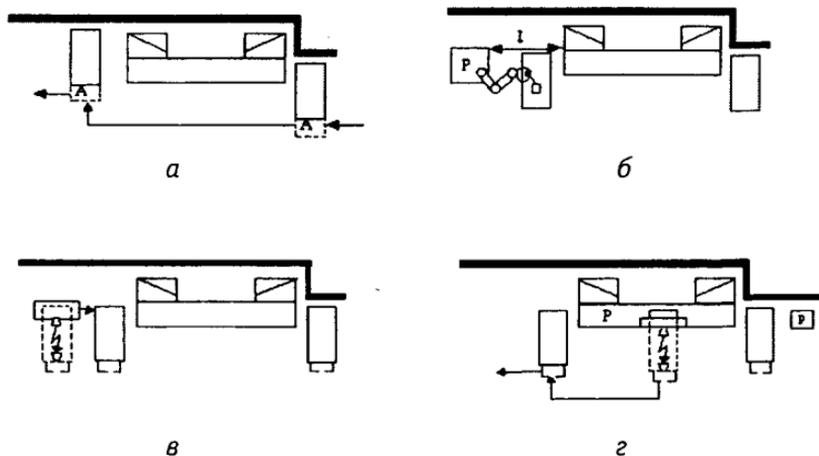


Рис. 3.18. Схемы применения робота для передвижки секций механизированной крепи в очистном забое:

- а* — традиционная передвижка; *б* — манипулятор робота перемещает гидрораспределитель секции; *в* — робот передает команды на приемник своей секции; *г* — робот передает команды на приемник любой секции

В третьем варианте (рис. 3.18, *г*) робот-крепепередвижник устанавливают на комбайне. Секции крепи оборудованы инфракрасными приемниками и блоками управления, связанными через шину. При движении комбайна робот с помощью инфракрасного передатчика передает на противоположную секцию команду вызова другой секции на заданном расстоянии от комбайна и ее передвижки.

Подобная идея предлагается для выемки пластов угля толщиной 0,3–0,7 м с углом залегания более 40°. Манипуляционный робот (1) движется перед комбайном (3) и захватывает модуль (2) пневмобаллонной крепи (рис. 3.19).

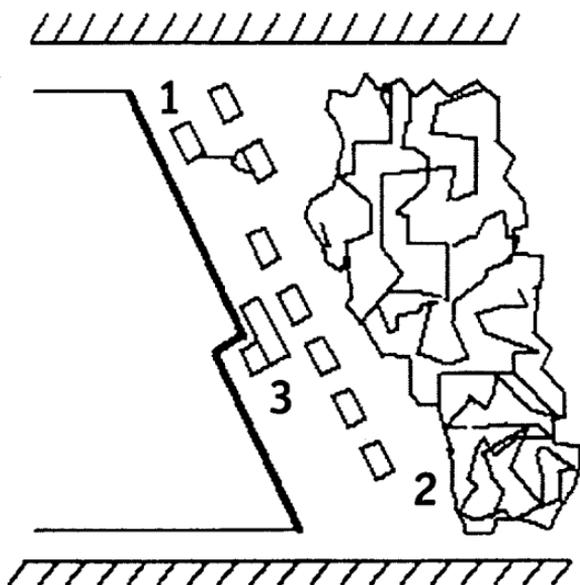


Рис. 3.19. Роботизированная технология выемки весьма тонких крутых пластов угля: 1 — робот-крепепередвижник; 2 — пневмобаллоны; 3 — выемочный комбайн

Захват петли крепи манипулятором робота возможен с помощью подпружиненного крюка, по сигналу дальномера или по направляющему тросу.

После захвата он выпускает воздух из баллона, перемещает его к забою и подает воздух в баллон до полного распора. Затем робот поднимается к следующему модулю крепи.

При выемке угля под слоем твердеющего закладочного материала самоходный робот-гидромонитор (1) движется на забой, отбивая полезное ископаемое струей воды (рис. 3.20). Смесь угля и воды стекает под уклон в углеспускную печь (2). После выемки слоя на почве укладывают гибкое перекрытие (3) и устанавливают анкеры (4). Выработанное пространство заливают твердеющей смесью. После ее затвердевания вынимают ниже лежащий слой.

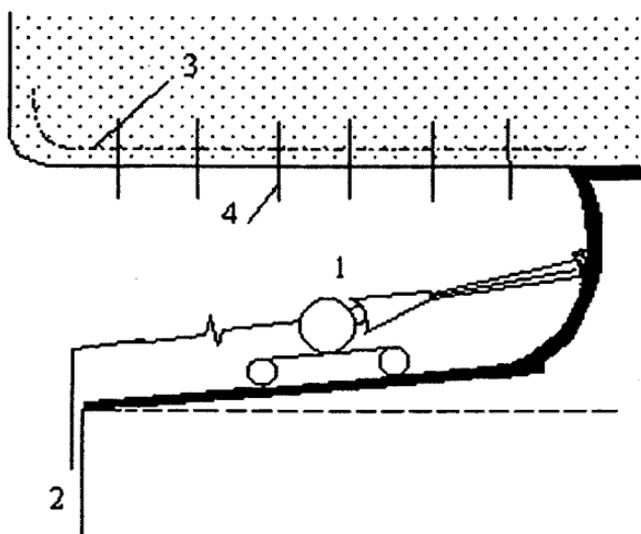


Рис. 3.20. Роботизированная выемка угля под слоем твердеющего закладочного материала:

- 1 — робот-гидромонитор; 2 — углеспускная печь;
3 — гибкое перекрытие; 4 — анкерное крепление

Выемочные роботы с рабочими органами в виде стрелы проходческого комбайна могут быть рассредоточены вдоль конвейера в длинном забое.

В распространенной технологии камерной выемки руды машинист ковшовой погрузочно-транспортной машины не может въезжать в камеру из-за опасности вне-

запных падений кусков сверху. В камере теряется около 20% отбитой руды. Оснащение машины системой дистанционного управления превращает ее в телеуправляемый самоходный манипулятор. В роботизированной технологии выемки камерами (рис. 3.21) робот-бурильщик в транспортной выработке (1) бурит веер скважин и заряжает их взрывчатым веществом. Перед въездом в камеру машинист (3) выходит из кабины и управляет погрузочно-транспортным манипулятором (4) из безопасного места. При исключении вентиляционной выработки (2) манипулятор может работать в загазованной камере. Подобная технология применяется на рудниках Норильска, Финляндии, Австралии, США.

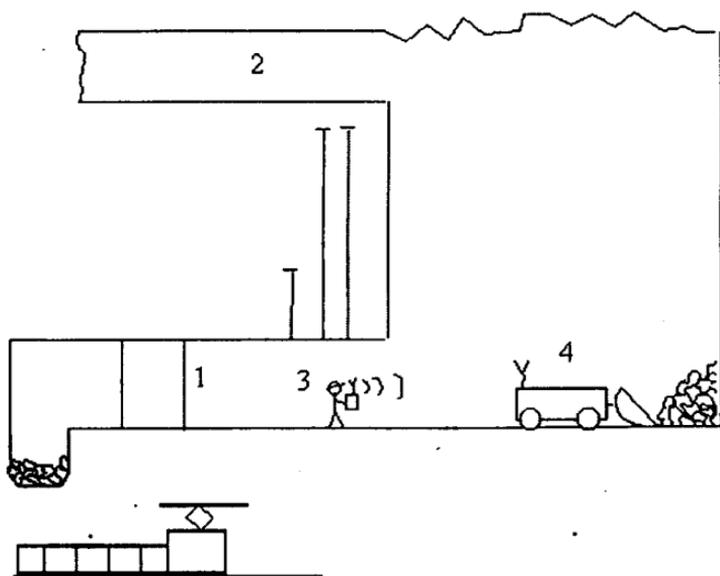


Рис. 3.21. Схема дистанционного управления работой погрузочно-транспортной машины:

1 — транспортно-буровой штрек; 2 — вентиляционный штрек; 3 — оператор; 4 — погрузочно-транспортная машина

При проведении аварийных работ найдут применение информационные роботы — для оценки ситуаций в опасных зонах, мобильные роботы для тушения пожаров, дистанционно управляемые самоходные манипуляторы — для устранения опасных ситуаций, вывоза пострадавших и оборудования.

3.8.2. Металлургия

Особенностями объектов роботизации являются перенос тяжелых грузов с невысокой точностью позиционирования, расширенная зона обслуживания, работа при повышенной температуре, разнообразие форм и размеров объектов манипулирования. На первом этапе ввод робототехники позволит сократить затраты тяжелого ручного труда, а на втором — создать роботизированные технологические комплексы, исключющие участие человека в процессе. Для отрасли предлагались следующие приложения робототехники:

- шагающий робот для укладки кирпичей и выравнивания днища доменной печи до ее полного остывания, длящегося несколько месяцев;
- манипулятор для загрузки заготовок в нагревательную печь и выгрузки нагретых заготовок;
- подвесной манипулятор для захвата и перемещения полосы проката во время ее движения по рольгангу;
- манипулятор для замены валков рольганга;
- манипулятор для нанесения клейма изготовителя на нагретое изделие.

3.8.3. Строительство

Применение роботов непосредственно на стройплощадке ограничено из-за перемещения фронта работ, разнообразия технологических операций, необходимости манипулирования тяжелыми объектами в ограниченном пространстве. Мобильные окрасочные роботы

с контурным управлением могут применяться для внутренней отделки помещений. Созданы роботы, способные перемещаться по вертикальной стене с помощью присосок. Их используют для сварки цилиндрических резервуаров, устранения дефектов поверхности, мытья окон, тушения пожаров. При производстве строительных материалов могут быть применены:

- сбалансированные манипуляторы для установки окон и дверей в проемы стеновых панелей;
- сварочные роботы для изготовления арматурных каркасов;
- манипуляторы для загрузки печей обжига керамических труб;
- мобильные манипуляторы для укладки бетона и выравнивания незастывшего бетона;
- окрасочные роботы для высококачественных покрытий;
- разнообразные манипуляторы для погрузочно-разгрузочных работ.

3.8.4. Подводные работы

В морской воде образуются железо-марганцевые конкреции, лежащие на дне континентального шельфа. Для их сбора разрабатывался дистанционно управляемый подводный мобильный робот, связанный с судном линией транспортировки конкреций. Разрабатываются информационные роботы для разведки дна океана, ремонта нефтедобывающих платформ, подводных кабелей и трубопроводов, корпусов кораблей. Для автономного питания подводных роботов разрабатывают способы получения электроэнергии путем разложения металлического водорода и применения кислородопоглощающих губок, испытывают малогабаритные бортовые источники питания на базе литиевых и радиоизотопных батарей

3.8.5. Сельское хозяйство

Еще в 50-х г. были созданы автоматически управляемые тракторы, копирующие движения машины с трактористом. Идея оказалась неработоспособной из-за постепенного расхождения тракторов вследствие различия действующих на них внешних факторов. Впоследствии на ведомых тракторах применяли распознавание почвы оптоэлектронными или ультразвуковыми датчиками.

Испытан робот для посадки рассады, который выполняет операции извлечения пучков рассады из поддонов и укладки в посадочную машину со скоростью выше, чем при ручной посадке. Для теплиц большой площади разработан транспортный робот, обеспечивающий доставку рассады или собранного урожая (рис. 3.22).

Рабочий Р из удаленного места теплицы заказывает вид рассады и срок ее доставки. На складе С на платформу транспортного робота ТР устанавливают самоходные микророботы МР с заказанными груза-

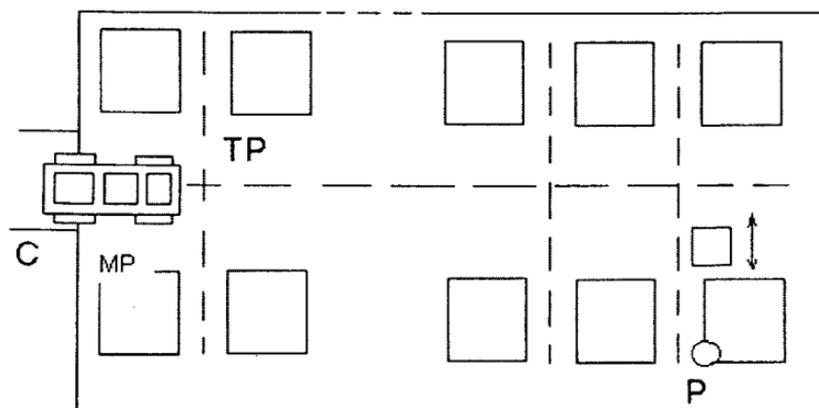


Рис. 3.22. Применение транспортного робота для работ в теплице: Р — рабочий; ТР — транспортный робот; С — склад; МР — микроробот

ми. Транспортный робот движется по информационной направляющей и останавливается перед проходами, в которых был сделан заказ. После остановки с него съезжает микроробот и доставляет груз к месту заказа.

В макете робота для обнаружения и сбора апельсинов используется система технического зрения с узкополосным фильтром, формирующая изображение апельсина в виде белого круга на темном фоне листы. Роботизированная газонокосилка распознает границу между скошенной и нескошенной травой по контрастной линии, полученной с помощью системы технического зрения. В Австралии разрабатывают роботы для автоматизированной стрижки овец по сигналу ультразвукового датчика контуров кожи.

3.8.6. Легкая промышленность

Разнообразие и нежесткая форма изделий, необходимость связи с высокопроизводительным основным оборудованием требуют разработки специальных роботов:

- автоматический манипулятор для съема шпυль с намоточных машин и их укладки на транспортную тележку;
- автоматический манипулятор с групповым захватным устройством для съема носочных изделий с формовочной машины и их укладки на конвейер;
- автоматический манипулятор для перекладки стандартной и бракованной обуви со стола контроля на транспортеры готовых изделий и брака;
- робокар для обслуживания ткацких станков;
- подвесной транспортный манипулятор для транспортирования рулонов ткани между станками и цехами;
- робот с контурным управлением для ориентации заготовок ткани и сшивания одежды, складирования готовых изделий;

• робот для ориентации кусков кожи при много-стадийной выделке.

На рис. 3.23 показано групповое захватное устройство для извлечения из коробки шпуль с намотанным волокном.

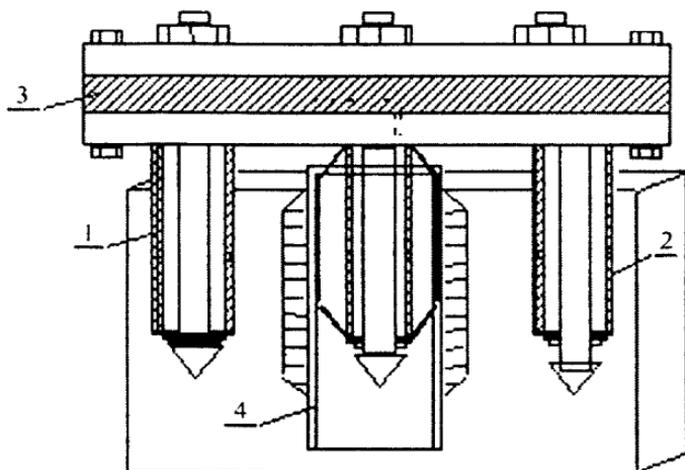


Рис. 3.23. Групповое захватное устройство для извлечения шпуль с нитью из коробки:

- 1 — отрезок трубки; 2 — резиновая оболочка;
3 — трехслойная плита; 4 — шпуля с нитью

Устройство состоит из отрезков трубок (1), обтянутых резиновой оболочкой (2) и закрепленных на трехслойной плите (3). При подаче сжатого воздуха через средний слой внутрь трубок резиновые оболочки раздуваются, плотно захватывая шпули изнутри. Захватное устройство со шпулями поднимают с помощью сбалансированного манипулятора, который переносит шпули на стержни транспортной тележки, а затем подает команду снятия распора. После этого шпули под действием собственного веса скользят по стержням вниз.

Применение робокара 1 для съема готовых рулонов ткани 2 с вала 3 намоточной машины 4 позволит исключить тяжелый физический ручной труд по переноске рулонов к транспортному устройству (рис. 3.24). Робокар движется вдоль ряда машин по пилообразной траектории, замедляя движение на участках, параллельных валу 3. Сбоку робокара вынесено пассивное захватное устройство в виде желоба, задняя часть которого имеет торцевую стенку с прорезью для вала. В процессе движения рулон захватывается торцевой стенкой, падает в желоб и скатывается в накопитель 5 робокара.

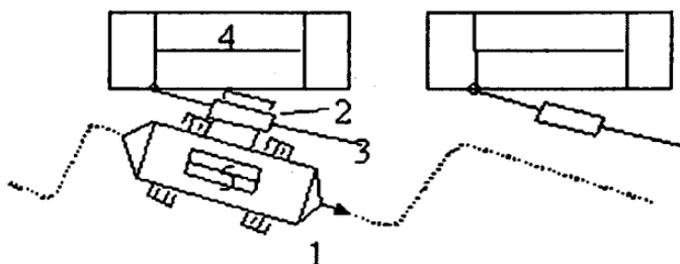


Рис. 3.24. Применение робокара (1) для съема рулонов ткани (2) с вала (3) намоточной машины (4)

3.8.7. Микроэлектроника

Около 70% трудоемкости изготовления плат микроэлектроники приходится на сборку, отличающуюся сверхминиатюризацией, разнообразием операций, чувствительностью к пыли, влажности и статическому электричеству. Ручная сборка плат вообще невозможна из-за малых расстояний между элементами платы.

Применяемые в микроэлектронике роботы должны обеспечивать повышенную скорость перемещений, точное позиционирование и высокую надежность [25]. Они используются на операциях микросварки выводов интегральных схем с распознаванием мест сварки системой технического зрения, установки кристалла в кор-

пус микросхемы, установки компонентов на печатную плату с распознаванием координат отверстий по подсветке платы снизу и контролем ввода выводов в отверстия по сигналам силомоментных датчиков манипулятора, отбраковки микросхем и печатных плат путем их сопоставления с эталоном, сортировки готовых изделий, сборки изделий из электронных плат.

Для снижения стоимости телевизоров отклоняющую систему приклеивают к горловине кинескопа, после чего регулировка распределения яркости по экрану становится невозможной. Недоступная для человека точность позиционирования роботом отклоняющей системы перед приклеиванием позволяет снизить долю брака и повысить производительность.

Применение роботов в микроэлектронике позволяет адаптировать оборудование к быстрой сменяемости изделий и реализовать новые технологии, недоступные для человека.

3.8.8. Микроробототехника

В последнее время стали развиваться микророботы, оснащенные нетрадиционными приводами микроперемещений [25]. Обмен информацией между микророботами в реальном времени позволяет рассматривать их совокупность как мультиагентную систему, функционирование которой направлено на достижение поставленной цели. В отличие от традиционных систем, при мультиагентном управлении программа управления микророботом зависит от изменения поведения других микророботов.

3.8.9. Лабораторные работы

Роботы используют для отбора проб в недоступных местах, проведения повторяющихся экспериментов, мытья лабораторной посуды, работы с радиоактивными веществами, точного дозирования компонентов смеси.

3.8.10. Медицина

Разрабатываются манипуляторы для проведения микрохирургических операций с точностью, недоступной руке человека. Для осмотра внутренних органов, направленного ввода лекарств и хирургических манипуляций применяют многозвенные манипуляторы с эффектом памяти формы.

В 2000 году была проведена первая трансатлантическая операция, при которой хирург из США, управляя манипулятором через Интернет, провел операцию по удалению желчного пузыря пациенту во Франции.

3.8.11. Боевые роботы

Шагающий механизм военного назначения был разработан в конце 60-х г. Размером со слона, он работал под управлением рук и ног человека в кабине наверху и мог преодолевать значительные препятствия. Современные боевые шагающие роботы могут двигаться к заданной человеком цели со скоростью до 20 км в час. Ставится задача создания полностью автономных мобильных роботов и роботизированных огневых точек, которые способны самостоятельно адаптироваться к обстановке при потере связи. Летающий разведывательный робот-вертолет оснащен телекамерами дневного и ночного видения, лазерным целеуказателем, тепловизором и средствами постановки ложных целей. Дистанционно управляемые мобильные роботы с бортовыми телекамерами применяют для осмотра подозрительных предметов и невзорвавшихся снарядов, борьбы с террористами, охраны объектов. Весьма эффективным считают применение мобильных боевых машин с дистанционным управлением из безопасного места.

3.8.12. Обслуживание людей

По прогнозам японских специалистов, область применения роботов в домашнем хозяйстве станет в 10 раз шире, чем в промышленности. Создан робот-официант, принимающий заказ и доставляющий его клиенту. Разрабатываются роботы для обслуживания инвалидов по голосовым командам, вождения слепых по заданным ориентирам, уборки помещений, доставки разных предметов, приготовления пищи.

3.8.13. Космическая робототехника

Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства НАСА (США) выделяет четыре вида космических роботов: исследовательские системы, глобальные обслуживающие комплексы, системы индустриализации космоса и транспортные системы.

Первый в мире космический исследовательский робот «Луноход» обследовал часть поверхности Луны и передал на Землю образцы лунного грунта. Задержка около 3 секунд в передаче и приеме сигналов значительно усложняла управление роботом с Земли.

В посадочном модуле американского лунного космического аппарата «Сервейор» был размещен манипулятор пантографного типа, способный выкопать траншею глубиной 0,45 м в рабочей зоне площадью 2,2 м². В спускаемых на Марс американских аппаратах «Викинг» в течение двух лет работали манипуляторы по зачерпыванию горной массы и ее передаче в бортовые автоматические лаборатории и биологические анализаторы. На космическом корабле многоразового использования «Спейс Шаттл» был установлен дистанционно управляемый манипулятор длиной 15 м, способный выводить и снимать с орбиты искусственные спутники и другие объекты. Манипулятор использовался также для профилактических работ на корабле.

Робот на космической станции предназначен для осмотра и ремонта внешних устройств, захвата спутников, замены модулей на спутниках. Разрабатываются планы добычи минералов на Луне и других планетах с помощью автоматических вездеходов, связанных с базой, которую предполагается смонтировать на планете с помощью строительных роботов. Начата работа над концепцией самовоспроизводящихся космических роботов, собирающих подобных себе роботов из деталей готового набора и переписывающих свое программное обеспечение в систему управления изготовленного робота. Транспортные космические роботы предназначены для доставки сырья с других планет на Землю и грузов для космических станций и баз на другие планеты.

Созданы дистанционно управляемые манипуляторы для разведки и отбора проб на других планетах. Считается перспективным применение космических роботов для новых технологических процессов, требующих невесомости, вакуума, использования сырья астероидов.

3.8.14. Устранение последствий катастроф

Созданы автономные роботы, способные работать при высокой радиации. Такие роботы типа МФ-3 (Германия) и СТР-2 (Россия) опускались вертолетом в опасную зону для сбора радиоактивных обломков после аварии на Чернобыльской АЭС. С помощью гамма-прицела робот отыскивает источник повышенной радиации и наводит на него захватное устройство. Дистанционно управляемые мобильные роботы могут вести ремонт ядерных реакторов, обеззараживание загрязненного оборудования, обследование скрытых полостей. Опытный образец такого робота с бортовой телекамерой может проходить в двери, разворачиваться на месте, преодолевать лестничные переходы, двигаться под углом 300° , преодолевать барьеры и траншеи размером до 300 мм. На открытой местности робот может осматри-

вать территорию для оценки разрушений, отыскивать проходы; собирать радиоактивные обломки, передавать данные для карты радиационной обстановки, разбирать завалы. При обычной работе робот ведет обеззараживание оборудования перед ремонтом, осмотр скрытых полостей, профилактические работы.

3.9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОВ

Робот является объектом повышенной опасности. Первый случай гибели человека от действий робота был зарегистрирован на японском заводе. Наладчик, находившийся в рабочей зоне, устранил неисправность фрезерного станка с отключенным роботом и подключил робота к станку. Манипулятор, движущийся со скоростью около 1 м/с, прижал наладчика и раздавил его. В среднем, на 100 промышленных роботов приходится один несчастный случай в год. В течение 14 дней работы роботизированного технологического комплекса возникает примерно 3 травмоопасные ситуации.

Основными причинами травматизма при работе роботов являются:

- неожиданные действия робота в процессе его обучения и работы;
- ошибки при ремонте и наладке робота;
- нахождение оператора в рабочей зоне при автоматической работе робота;
- размещение пульта управления в рабочей зоне робота;
- неисправность или отключение защитных устройств.

Большинство случаев травматизма обусловлено неисправностями устройства управления и ошибками программирования.

В рассказе «Скиталец» (1942 г.) американский фантаст Айзек Азимов сформулировал *три закона безопасности робототехники*:

— робот не должен своим действием или бездействием причинять вред человеку.

— робот должен повиноваться командам, которые ему дает человек, кроме тех случаев, когда эти команды противоречат первому закону;

— робот должен заботиться о своей безопасности, если это не противоречит первому и второму законам.

Основным средством обеспечения безопасности является предотвращение одновременного появления человека и подвижных элементов робота в одной точке рабочей зоны робота.

Устройства защиты должны останавливать движение элементов робота в тех областях рабочей зоны, где находится человек. При внезапном отключении питания движение звеньев робота должно прекращаться. Вдоль трассы движения подвешенного робота должны устанавливаться сетки, защищающие людей и оборудование от внезапного падения переносимых объектов.

Устройства контроля отработки программы контролируют появление звеньев робота в определенных точках рабочей зоны. Ими могут быть путевые переключатели, срабатывающие при прохождении звена через точку.

Устройства контроля взаимодействия робота со средой отключают приводы звеньев при увеличении сопротивления движению, например при касании препятствия одним из звеньев. Для измерения нагрузки применяют силомоментные или тактильные датчики.

Ограждение рабочей зоны осуществляют с помощью сеточных ограждений, переходных мостиков, световых барьеров. Сеточные ограждения и переходные мостики применяют для предотвращения доступа людей в рабочую зону. Световой барьер представляет собой стойку светоизлучателей и стойку фотоприемников (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Световой барьер

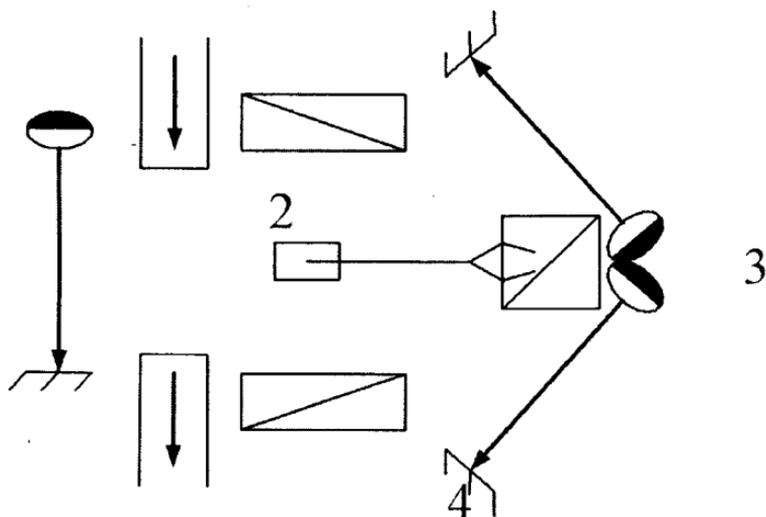


Рис. 3.26. Ограждение рабочей зоны световыми барьерами:
 1 — технологическое оборудование;
 2 — робот; 3 — светоизлучатель;
 4 — фотоприемник

Если каждый фотоприемник получает свет от соответствующего светоизлучателя, то роботизированный комплекс работает. Появление объекта между стойкой светоизлучателей и стойкой фотоприемников приводит к пересечению светового луча, вследствие чего оборудование отключается. Для ограждения роботизированного комплекса со всех сторон применяют несколько световых барьеров (рис. 3.26).

3.10. ИСТОЧНИКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОБОТОТЕХНИКИ

Выделим три вида источников эффективности робототехники:

— поддающиеся оценке существующими методами, такие как повышение производительности, снижение затрат на рабочую силу;

— требующие специальной оценки, такие как улучшение условий труда, стабилизация операций, сокращение затрат на модернизацию производства;

— не поддающиеся прямой оценке, такие как повышение конкурентоспособности, эффект от интеграции систем проектирования, подготовки производства и самого производства.

Рассмотрим источники эффективности первого вида.

Повышение производительности оборудования путем увеличения его загрузки

Увеличение производительности машины не приведет к увеличению производительности участка из-за медленного выполнения человеком вспомогательных операций. Кроме того, возможности ручного обслуживания единицы оборудования ограничены такими свойствами человека, как низкая скорость восприятия и обработки количественной информации, необходимость

накопления опыта, потребность в перерывах на отдых, плохое запоминание количественной информации.

Повышение производительности за счет сокращения времени обработки изделия

Продолжительностью технологического цикла t_u называют промежуток времени, по истечении которого технологическое оборудование возвращается в исходное состояние. Цикловая производительность определяется объемом продукции K , выпущенной за цикл:

$$Q_u = \frac{K}{t_u}$$

Источник эффективности оценивают коэффициентом роста производительности:

$$k_{\text{инт}} = (t_1 / t_2) / (K_{31} / K_{32}),$$

где t_1, t_2 — продолжительность технологического цикла до и после автоматизации; K_{31}, K_{32} — коэффициенты загрузки оборудования до и после автоматизации.

Экономия зарплаты высвобождаемых рабочих

Эффект оценивается как разность среднегодовой зарплаты персонала до и после роботизации:

$$\Delta Z = \left[\sum_{i=1}^m (C_i r_i)_1 - \sum_{i=1}^m (C_i r_i)_2 \right] k_0,$$

где C_i — среднегодовая зарплата рабочего i -й группы; r_i — число рабочих в группе; k_0 — коэффициент отчислений работодателя.

При оценке эффективности следует учитывать экономию доплат за работу в ночные смены и социальных выплат, скрытых в общих затратах предприятия.

Сокращение затрат на жизнеобеспечение рабочих

Это затраты на проветривание и кондиционирование воздуха, освещение, средства индивидуальной защиты, которые связаны с обеспечением нормальной работы человека.

Уменьшение размера оборотных средств в незавершенном производстве

К незавершенному производству относятся запасы материалов, полуфабрикатов и комплектующих между смежными звеньями технологической цепи. При ручном производстве они позволяют избежать простоев последующего звена во время ремонта предыдущего звена. В незавершенном производстве омертвляется овеществленный труд, затраты которого пропорциональны объему запасов и сроку хранения. Роботизированное производство позволяет согласовать производительность смежных звеньев и организовать их ритмичную работу. Эффект от сокращения незавершенного производства рассчитывается по формуле:

$$Z = 0,5 \sum_{i=1}^n \frac{3m_i}{B_i} (C_{1i}P_{1i} - C_{2i}P_{2i}) + \sum_{i=1}^n (T_{1i} - T_{2i}),$$

где Z — число деталей, приходящееся на одно рабочее место (одна ожидает обработки, вторая — обрабатывается, третья — транспортируется после обработки); m_i — объем i -й партии запуска; B_i — годовой объем деталей в i -й партии; C_{1i}, C_{2i} — себестоимость деталей в i -й партии до и после автоматизации; P_{1i}, P_{2i} — число единиц оборудования до и после роботизации; $0,5$ — коэффициент нарастания затрат при движении от материала к изделию; n — число партий в годовой программе выпуска; T_{1i}, T_{2i} — затраты на хранение и транспортировку i -й партии деталей.

Сокращение производственных площадей

Вследствие увеличения загрузки автоматизированного оборудования появляется возможность сокращения занимаемой им площади. Эффект от сокращения производственных площадей оценивается по экономии затрат на строительство помещений и текущих затрат на их содержание:

$$\Delta_{\Pi} = K_{\Pi\Pi}(S_2 - S_1) + K_B(S'_2 - S'_1) + P[(S_2 + S_1) - (S'_2 + S'_1)],$$

где $K_{\Pi\Pi}$, K_B — стоимость 1 м² производственных и служебно-бытовых помещений; S_1 , S_2 — площади, занимаемые оборудованием до и после автоматизации; S'_1 , S'_2 — площади служебно-бытовых помещений; P — затраты на содержание 1 м² помещений (уборка, тепло, вентиляция, освещение).

Снижение потерь от брака

Обеспечивается за счет стабилизации операций обработки и соблюдения технологической дисциплины при автоматическом управлении процессом. Оценивается по сокращению стоимости бракованных изделий:

$$\Delta_B = C_{\Pi}MB(a_1 - a_2),$$

где C_{Π} — стоимость единицы массы изделия; M — масса изделия; B — годовой выпуск изделий; a_1 , a_2 — процент брака до и после автоматизации.

Экономия материалов и энергии

Обеспечивается за счет рационального выполнения операций в автоматическом режиме: минимизации отходов при раскрое материалов; сокращения расхода краски при нанесении покрытий или порошка при плазменном напылении; оптимизации режимов сварки.

Выручка от продажи оборудования с ручным управлением

Оценивается как ликвидационная стоимость демонтируемого в результате роботизации оборудования:

$$\mathcal{E}_x = K_1 - a_1 t - bK_1,$$

где a_1 — амортизационные отчисления; t — срок эксплуатации; b — коэффициент затрат на демонтаж и продажу.

Некоторые источники эффективности робототехники требуют специальной оценки.

Улучшение социальных характеристик труда рабочих

Эффект проявляется в виде сокращения социальных потерь, обусловленных непосредственным участием рабочих в технологическом процессе и скрытых в общих затратах предприятия. К ним относятся: потери от травматизма, утомляемости, профессиональных заболеваний и текучести кадров; затраты на охрану труда, подготовку кадров, дотации на жилье и социально-бытовое обслуживание, различные выплаты и льготы.

Снижение затрат на технологическую подготовку производства

Эффект образуется вследствие универсальности оборудования и автоматизированной подготовки управляющих программ. Безбумажная подготовка технической документации и прямая передача программ в устройства управления оборудованием позволяет в несколько раз повысить производительность труда проектировщиков и технологов, оптимизировать конструкции объектов производства и технологические маршруты.

Снижение расходов на эксплуатацию и ремонт оборудования

Образуется за счет выполнения производственной программы меньшим числом единиц оборудования в результате роботизации. Оценивается как разность затрат на рабочую силу:

$$\mathcal{E}_p = C_2 r_2 R_2 - C_1 r_1 R_1,$$

где C_1, C_2 — среднегодовая зарплата рабочего до и после автоматизации; r_1, r_2 — число рабочих на единицу оборудования; R_1, R_2 — число единиц оборудования до и после автоматизации.

Повышение качества продукции за счет стабилизации процессов и исключения влияния субъективного фактора

Образуется за счет повторения рациональных циклов управления независимо от степени усталости и квалификации рабочего, например при сварке, окраске, нанесении покрытий.

Сокращение потерь на приобретение рабочими опыта

Несмотря на то, что роботизация производства требует повышения затрат на подготовку кадров, в ее результате исключается необходимость длительного накопления рабочим опыта, необходимого для выполнения сложных операций сварки, окраски, сборки, резания материалов. Адаптивное управление этими операциями по рациональным алгоритмам и с высокими скоростями приводит к независимости качества процесса от опыта рабочего.

Сокращение убытков от несчастных случаев

Работодатель обязан выплачивать страховые отчисления, размер которых зависит от числа занятых на производстве и частоты случаев травматизма. Роботизация приводит к сокращению этих выплат. Эффект оценивается в виде сокращения страховых выплат и компенсаций в связи с несчастными случаями. Кроме того, высокая вероятность несчастных случаев на рабочих местах приводит к нехватке кадров и требует компенсирующего повышения зарплаты, не связанного с производительностью и качеством труда.

Повторное использование средств робототехники при модернизации производства

Универсальность механической базы роботов позволяет повторно использовать их при изменении производства. Эффект оценивается как экономия затрат K_p на модернизацию производства:

$$\mathcal{E}_m = K_p.$$

Сложнее всего оценить такие, входящие в третью группу источники эффективности робототехники, как быстрый переход на выпуск конкурентоспособной продукции, взаимодействие подсистем производства и управления производством, взаимосвязь проектирования, подготовки производства и выпуска объектов производства.

3.11. ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Известные методы оценки эффективности внедрения новой техники мало пригодны для робототехники, поскольку они не учитывают социального эффекта роботизации, организационно-технологической перестрой-

ки процесса и эффекта от гибкости производства. В результате эффективность роботизации занижается, часто до убытков.

В отличие от обычной техники инвестиции в роботизацию производства отличаются тем, что ввод роботов:

- обеспечит не только экономию зарплаты высвобождаемых рабочих, но и сокращение затрат на вспомогательные и кадровые службы;

- обеспечит способность производства быстро реагировать на изменение рыночной ситуации;

- позволит перейти к компьютерно-интегрированному производству с оптимизацией процессов и планированием работы;

- позволит быстро адаптироваться к модернизации производства.

Формальное технико-экономическое обоснование роботизации производства привело к кризису отечественной робототехники в конце 80-х гг. Суммарный экономический эффект от применения роботов на 600 предприятиях страны составил 0,05% затрат на роботизацию [27]. На одного высвобожденного рабочего приходилось 7 роботов. Роботы вводились без реорганизации производственного процесса и не были связаны с технологической инфраструктурой производства. Роботизированные участки не использовались для многономенклатурного выпуска изделий. Не анализировались разнообразные варианты и косвенная эффективность применения роботов. Более 70% роботов имитировали действия рабочего, выполняя простейшие операции загрузки и разгрузки оборудования. Несоответствие между возможностями робототехники и традиционной организацией производства привело к отторжению роботов на предприятиях.

За рубежом технико-экономическое обоснование роботизации занимает до 40% времени проектирования. На этом этапе отбрасывается до 90% вариантов роботизации, как экономически нецелесообразных. Изме-

нения производства в связи с роботизацией приводит к значительному росту эффективности. Чаще всего рассчитывают период T окупаемости затрат на роботизацию при допущении, что робот заменяет одного рабочего в смену. Для этого используют формулу создателя первого промышленного робота Д. Энгельбергера:

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

где I — затраты на роботизацию; L — годовая экономия затрат на рабочую силу с учетом страховых выплат; E — годовые затраты на обслуживание робота; Z — годовые амортизационные отчисления; $\pm q$ — коэффициент изменения производительности («+», если робот работает быстрее рабочего; «-», если робот работает медленнее человека).

Обычно период окупаемости не превышает 4 лет. В мировой практике часто применяют правило рентабельности промышленной робототехники: один робот должен высвобождать 2,5 рабочих при трехсменной работе и сроке окупаемости до 3 лет.

Для оценки целесообразности роботизации в машиностроении предлагаются десятки методов: выбор по минимуму приведенных затрат, оценка цеховой себестоимости, сравнение нормативной и фактической трудоемкости, расчет затрат на единицу продукции, оценка коэффициентов рентабельности и роста производительности труда, метод балльной оценки рабочих мест и др.

Разделим их на четыре группы. Согласно распространенному правилу минимизации затрат, сравнивают суммы затрат на роботизацию и выбирают проект с наименьшими затратами. При этом затраты приводят к одинаковому времени, сравнивают среднегодовые инвестиции и общие затраты, сопоставляют продолжительность эффективной загрузки оборудования. По методу расчета периода окупаемости капиталовложений сравнивают

отношения инвестиций к годовой экономии для вариантов применения роботов. В методе *расчета скорости окупаемости инвестиций* рассчитывают норму прибыли для каждого варианта, а затем сравнивают ее со средней нормой прибыли по годам или запланированной прибылью, обеспечивающей равенство доходов и инвестиций. *Метод определения предельно допустимой суммы инвестиций* основан на том, что рассчитывают, сколько часов сможет проработать робот, заменивший рабочих. Затем умножают число часов на полную часовую зарплату рабочего и получают лимит затрат на роботизацию. Предельные затраты на замену рабочих роботами [28] рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{3}{1/N + E_H},$$

где 3 — годовая экономия затрат на рабочую силу; N — срок службы робототехники; E_H — нормативный коэффициент окупаемости инвестиций.

Эффективность робототехнической системы, выпускающей продукцию стоимостью Q , рассчитывают как отношение:

$$E = \frac{Q}{E_d + E_q + E_f},$$

с помощью показателей:
 прямых затрат:

$$E_d = Z + P + C_c + C_H,$$

качества:

$$E_q = C_q + C_b,$$

и гибкости:

$$E_A = C_c + C_d + C_p + C_m + C_t,$$

где Z — стоимость рабочей силы; P — процентная ставка на инвестированный капитал; C_c — стоимость

сырья и материалов; C_H — амортизационные отчисления, налоги и расходы на обслуживание; C_q — расходы на обеспечение качества продукции; C_b — стоимость бракованной продукции; C_d — потери от простоев; C_p — расходы на переналадку оборудования; C_m — потери от простоев оборудования при модернизации; C_t — складские и транспортные расходы.

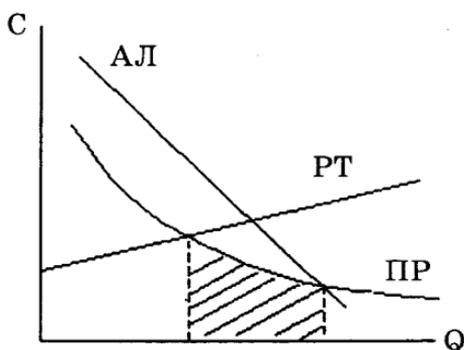


Рис. 3.27. Зависимость себестоимости C от производительности Q для ручного труда (РТ), промышленных роботов (ПР) и автоматических линий (АЛ)

С точки зрения стратегического эффекта следует учитывать, с одной стороны, рост стоимости рабочей силы, а с другой — уменьшение стоимости роботов за счет накопления опыта роботизации и роста объема продаж робототехники. Согласно эмпирическому закону накопления опыта, при увеличении продолжительности производства в n раз себестоимость изделий уменьшается вследствие накопления опыта по закону:

$$C = C_0 N^{-b}, \quad b = \frac{-\ln(1-a)}{\ln n},$$

где C_0 — начальная стоимость робота; N — объем выпуска роботов; $a = 0,2 \div 0,4$ — коэффициент снижения начальной стоимости.

Сопоставим себестоимость единицы продукции при повышении объема ее выпуска для трех вариантов производства (рис. 3.27):

- ручной труд (РТ);
- промышленные роботы (ПР);
- автоматические линии (АЛ).

По мере роста объема выпуска себестоимость изделий растет для ручного труда и падает для автоматических линий. Поскольку робототехнические системы слишком дороги для малых объемов выпуска и малопроизводительны при больших объемах производства, они занимают промежуточное место между ручным трудом и автоматическими линиями.

Если проанализировать историю технического прогресса человеческого общества, то можно увидеть, как с течением времени происходит замена ручного труда большого количества людей на работу механизмов. Появление принципиально новых средств замены ручного труда, таких как паровые машины, электричество или микропроцессоры, позже оценивается как научно-техническая революция. Но в создание таких средств вкладывался большой интеллектуальный и физический труд специалистов. *Труд людей, непосредственно занятых в процессе производства, называют живым. Труд людей, создававших орудия производства, называют овеществленным.*

Сельскохозяйственное производство начиналось с обработки земли лопатой или мотыгой. В их изготовление вкладывалось немного труда, но и производительность была невысока. Затем появились плуги на конной тяге, в несколько раз повысившие производительность обработки земли. Для этого потребовалось разработать конструкцию плуга и обеспечить содержание домашних животных. На следующем этапе стали применяться тракторы, сначала с узкозахватным, затем — с широкозахватным плугом. Производительность обработки резко повысилась. Но в

изготовление трактора и получение для него горючего из нефти был вложен труд тысяч людей. При ручной обработке поля требуется много людей с простыми орудиями труда. Это же поле может обработать один человек на тракторе, в котором овеществлен труд многих людей. Этот пример показывает, что чем выше степень технической оснащённости труда, тем меньше людей непосредственно участвуют в технологическом процессе и тем больше людей создают средства производства.

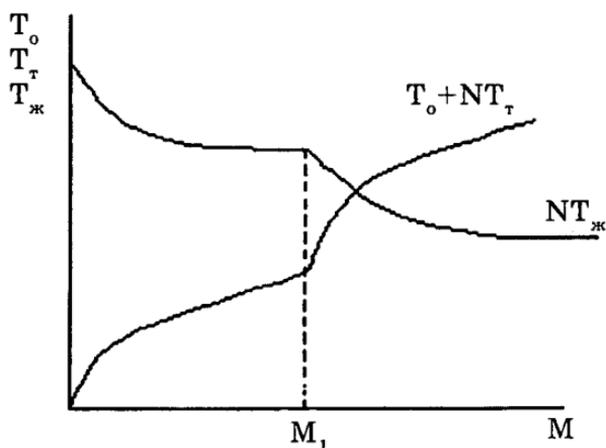


Рис. 3.28. Изменение затрат живого $N \cdot T_ж$ и овеществленного T_0 труда по мере повышения уровня механизации производства (M_1 — технологическая революция)

Как установить, произошла ли замена живого труда на овеществленный в результате применения робототехники на производстве? Годовые затраты труда на выпуск некоторого объема продукции Q можно представить в виде суммы [29]:

$$T = T_0 / N + T_T + T_{Ж} ,$$

где T_0 — затраты овеществленного труда людей, вложенного в создание оборудования; T_T — затраты овеществленного труда, вложенного в материалы и энергию; $T_{Ж}$ — затраты живого труда людей, занятых в технологическом процессе; N — срок эксплуатации оборудования.

На этапе ручного труда затраты труда (T_0), овеществленного в орудиях производства, невелики и основной составляющей общих затрат труда (T) является живой труд ($T_{Ж}$) (рис. 3.28).

По мере повышения уровня механизации производства происходит перераспределение затрат труда — растет доля овеществленного труда и уменьшается доля живого труда. При сохранении производительности изменения живого и овеществленного труда могут происходить с разной интенсивностью.

1. Затраты овеществленного труда $T_0 + N \cdot T_T$ выросли больше, чем сократились затраты живого труда $N \cdot T_{Ж}$. В результате общие затраты труда T увеличились.

Это может быть создание интеллектуальных роботов, имитирующих человека в традиционном технологическом процессе, неприспособленном к роботизации. Для того, чтобы придать роботу некоторые способности человека по восприятию среды, распознаванию ситуации и планированию действий, требуются огромные затраты труда многих специалистов. Но полностью заменить человека роботом вряд ли удастся, хотя некоторые простейшие действия робот может выполнять лучше человека. Это пример тупикового направления, если не учитываются такие факторы, роботизации как опасность участия людей в процессе, расширение возможностей человека, повышение скорости операций. Так, массовый ввод робототехники в неподготовленное машиностроительное производство СССР привел к увеличению затрат овеществленного труда в 25–30 раз без

опережающего снижения затрат живого труда, ухудшению фондоотдачи в 12–15 раз и, по-существу, — к кризису роботизации в конце 80-х гг.

2. Увеличение затрат овещественного труда $T_0 + N \cdot T_T$ равно уменьшению затрат живого труда $T_{ж}$. Общие затраты труда T при этом не меняются.

В этом случае надо выявить, есть ли перспективы расширения области применения нового оборудования. При расширении области применения затраты овещественного труда на научные исследования и опытно-конструкторские работы остаются постоянными. Растут лишь затраты на изготовление оборудования, материалы и энергию. Возможно, увеличится объем выпуска продукции или повысится безопасность труда. Такая ситуация может возникнуть, если рассматривается применение робота для одного технологического процесса. Если область применения робота ограничена одной технологией, а дополнительные затраты овещественного труда равны снижению затрат живого труда, то создание робота нецелесообразно.

3. Затраты овещественного труда $T_0 + N \cdot T_T$ выросли меньше, чем сократились затраты живого труда $N \cdot T_{ж}$. В результате общие затраты труда T уменьшились.

Такая ситуация возникает, если для замены физических движений человека создаются дешевые роботы с простейшими системами циклового управления или один робот заменяет труд нескольких рабочих.

Конечно, в этих соотношениях между овещественным и живым трудом не учитываются прирост производительности, социальные факторы и повышение конкурентоспособности продукции.

Таким образом, технический прогресс состоит в том, что доля живого труда должна сокращаться быстрее, чем растет доля овещественного труда, направленного на сокращение живого труда. Возвращаясь к промышленной робототехнике, рассмотрим пути уменьшения общих затрат труда T путем опережающей за-

мены живого труда на овеществленный:

- снизить затраты овеществленного труда T_0 , удешевив роботы;
- заменить одним роботом несколько рабочих;
- увеличить срок службы роботов N ;
- сократить расходы на материалы и энергию T_T ;
- повысить производительность роботизированного производства;
- разрабатывать универсальные роботы для широкого круга технологических приложений.

Критерий целесообразности роботизации должен показывать, что дополнительные затраты овеществленного труда на создание роботов будут меньше, чем снижение затрат живого труда. Он должен быть безразмерным с целью абсолютной оценки прогрессивности и сопоставления разных вариантов совершенствования технологического процесса. При оценке должно учитываться время эксплуатации оборудования.

Крупные затраты на робототехнику должны быть компенсированы ростом производительности труда от ее применения :

$$A = \frac{Q}{T} = \frac{QN}{T_0 + N(T_m + T_c)},$$

где Q — годовой выпуск продукции; N — срок эксплуатации оборудования; T — общие затраты труда; T_0 — разовые затраты труда; T_m , T_c — текущие затраты живого и овеществленного труда.

Очевидно, что чем больше суммарный выпуск продукции QN_i за N_i лет эксплуатации и меньше общие затраты труда $T_i = K_i + N_i \cdot (C_i + Z_i)$ на ее выпуск, тем выше уровень $P_i(N_i)$ совершенства технологического процесса:

$$P_i(N_i) = \frac{Q_i N_i}{K_i + N_i(C_i + Z_i)},$$

где C_i — годовые расходы на материалы и энергию; Z_i — годовые затраты на рабочую силу.

Смысл этого выражения прост: чем больше выпуск продукции и меньше затраты на производство в течение срока службы оборудования, тем выше уровень совершенства технологического процесса.

В зависимости от срока эксплуатации (N) объем выпущенной продукции линейно растет, если считать годовой выпуск продукции (Q_i) постоянным (рис. 3.29).

Единовременные затраты на оборудование (K_i) распределяются на весь срок эксплуатации (N_i). Поэтому надо иметь в виду, что (N_i) на рис. 3.29 является не текущим, а общим временем работы оборудования. К затратам (K_i) добавляются растущие по мере срока эксплуатации (N_i) затраты на материалы и энергию (C_i), а также на рабочую силу (Z_i).

В результате деления объема продукции на суммарные затраты зависимость уровня совершенства i -го технологического процесса (P_i) от общего срока эксплуатации оборудования (N_i) принимает форму гиперболы (рис. 3.29). По мере увеличения срока эксплуатации (N_i) единовременные затраты овецествлен-

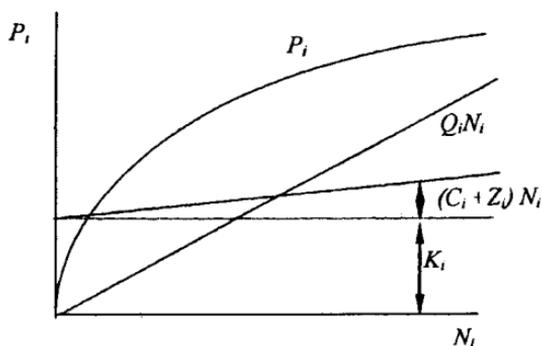


Рис. 3.29. Составляющие уровня совершенства технологического процесса P_i при разном сроке эксплуатации оборудования N_i

ного труда (K_i) распределяются на все больший выпуск продукции, и уровень технического совершенства (P_i) становится выше, приближаясь к пределу морального износа:

$$P_{\text{макс}} = \frac{Q_i}{C_i + Z_i}.$$

Но и для существующей технологии без робототехники тоже можно построить кривую совершенства технологического процесса

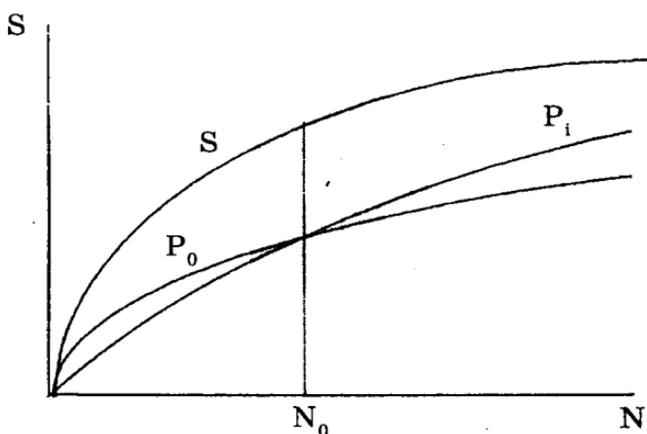


Рис. 3.30. Критерий S целесообразности роботизации

$$P_0(N_0) = \frac{Q_0 N_0}{K_0 + N_0(C_0 + Z_0)}.$$

Она может быть выше, ниже или пересекать гиперболу роботизированного технологического процесса $P_i(N_i)$. Таким образом, если уровень совершенства роботизированного технологического процесса выше, чем нероботизированного, то должно выполняться неравенство:

$$S = \frac{P_i(N_i)}{P_o(N_o)} = \frac{Q_i N_i [K_o + N_o (C_o + Z_o)]}{Q_o N_o [K_i + N_i (C_i + Z_i)]} > 1$$

На графике (рис. 3.30) это условие выполняется после пересечения гиперболы $P_i(N_i)$ для существующей технологии гиперболой $P_o(N_o)$ для роботизированной технологии при условии, что обе технологии начинают применяться одновременно.

Проекция точки пересечения гипербол на горизонтальную ось показывает минимальный срок эксплуатации робототехники N_o . Зависимость критерия целесообразности роботизации S от срока эксплуатации N на рисунке также имеет вид гиперболы. При увеличении срока эксплуатации прирост производительности замедляется.

Анализ условий, при которых гипербола $P_i(N_i)$ пересекает гиперболу $P_o(N_o)$, позволяет найти срок морального устаревания применяемой технологии, сопоставить альтернативы роботизации, ранжировать цели и источники эффективности роботизации, определить минимальный объем применения роботов, выбрать оптимальный срок замены нероботизированного оборудования на роботизированное, оценить оптимальный срок службы робототехники.

При механизации ручного труда стоимость овеществленного труда в существующей технологии незначительна и критерий целесообразности роботизации при сохранении производительности сводится к виду

$$S = \frac{N_o Z_o}{K_i + N_i (C_i + Z_i)},$$

показывающему, что уровень совершенства зависит от соотношения затрат на рабочую силу Z_i и стоимости робототехники K_i .

Разработанный критерий удобен тем, что в нем одновременно учитываются изменения производительности

сти и затрат на материалы и энергию, стоимости оборудования и затрат на рабочую силу. Сопоставление этих изменений позволяет оценить в безразмерной форме, компенсировались ли дополнительные затраты овецественного труда за счет повышения срока эксплуатации оборудования, роста производительности или сокращения затрат на рабочую силу.

При обосновании целесообразности роботизации многие показатели, такие как производительность, стоимость, затраты на материалы, энергию и рабочую силу, точно неизвестны. Они могут быть найдены в виде граничных условий целесообразности роботизации. Для их определения зададим условие целесообразности роботизации $S > 1$ и решим обратные задачи.

Требуется определить лимит затрат (K_i) на роботизацию, если известны стоимость существующего оборудования (K_o), производительность (Q_o, Q_i); годовые затраты на рабочую силу (Z_o, Z_i), материалы и энергию (C_o, C_i) до и после роботизации. Преобразуя выражение для критерия целесообразности роботизации при $S > 1$, найдем:

$$K_i < \frac{Q_i}{Q_o} [K_o + N(C_o - C_i) + N(Z_o - Z_i)].$$

Таким же образом можно определить, на какую величину должна повыситься производительность в результате роботизации, если известны затраты на существующую (K_o) и роботизированную (K_i) технологии, годовые затраты на рабочую силу (Z_o, Z_i), материалы и энергию (C_o, C_i):

$$\frac{Q_i}{Q_o} > \frac{K_i + NC_i + NZ_i}{K_o + NC_o + NZ_o}.$$

откуда

$$m_i < \frac{Q_i}{Q_o T_i w_i} \left[\frac{K_o}{N} + C_o + T_o w_o m_o - \frac{Q_o}{Q_i} \left(\frac{K_o}{N} + C_i \right) \right].$$

Часто требуется найти минимальное число рабочих, которые должны быть высвобождены в результате роботизации. Заданы изменение производительности (Q_i/Q_o), инвестиции в существующую (K_o) и роботизированную (K_i), технологии, годовые затраты на материалы и энергию (C_o, C_i). Раскроем выражение для оценки затрат на рабочую силу:

$$Z = Twm,$$

где T — число рабочих часов в год; w — часовая оплата труда рабочего, включая социальные составляющие; m — число рабочих.

После ввода этого выражения в критерий целесообразности роботизации и преобразований получим:

$$\frac{m_i}{m_o} < \frac{Q_i}{Q_o T_i w_i m_o} \left[\frac{K_o}{N} + C_o + T_o w_o m_o - \frac{Q_o}{Q_i} \left(\frac{K_o}{N} + C_i \right) \right],$$

Очевидно, низкая стоимость рабочей силы препятствует применению средств робототехники. К тому же, из-за слабой технической вооруженности и низкой производительности труда в машиностроении цена выпускаемого робота может быть высока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие особенности технологического процесса облегчают роботизацию?
2. Какие потери рабочего времени обусловлены работой человека?
3. Чем робот отличается от перепрограммируемого автомата?
4. Как выбрать деталь-представитель?
5. Что представляет собой роботизированный технологический комплекс?

6. Каковы способы установки роботов на рабочем месте?

7. Опишите три типа компоновки роботизированных технологических комплексов.

8. Что относится к вспомогательному оборудованию роботизированных технологических комплексов?

9. Чем накопитель-питатель отличается от накопителя?

10. Для чего применяют ориентирующее устройство?

11. Что представляет собой поворотный стол?

12. Какие операции выполняют роботы при холодной листовой штамповке?

13. Каковы требования к роботам, применяемым при горячей объемной штамповке?

14. Что требуется обеспечить при совместной работе робота и металлорежущего станка?

15. Опишите работу четырех видов компоновки роботизированных технологических комплексов механической обработки изделий.

16. Какие задачи может выполнять робот при обслуживании ванн гальванопокрытий?

17. Какие задачи может выполнять робот в литейном производстве?

18. Как выбрать число единиц оборудования, обслуживаемых одним роботом?

19. Чем двухпроходная роботизированная сварка отличается от однопроходной?

20. Какие способы нанесения покрытий могут быть реализованы роботами?

21. В чем заключаются преимущества нанесения покрытий с помощью роботов?

22. Какие технологии резания осуществляются с помощью роботов?

23. Как задают зоны абразивной зачистки для технологического робота?

24. Какие способы контроля применяют в контрольно-измерительных роботах?

25. Чем отличаются сборочные единицы «вал» и «корпус»?

26. На какие этапы делят сборочную операцию «вставить вал в отверстие»?

27. Опишите четыре компоновки роботизированных сборочных комплексов.

28. Какие средства робототехники могут быть применены в горном деле?

29. Какие задачи могут решаться с помощью роботов в металлургии, строительстве, на подводных работах, сельском хозяйстве, легкой промышленности, микроэлектронике, медицине, обслуживании людей, космосе, военном деле, ядерной энергетике?

30. Перечислите три закона безопасности робототехники.

31. Как исключить одновременное нахождение человека и звеньев манипулятора в одной точке рабочего пространства робота?

32. Какие функции выполняют устройства защиты, контроля отработки программы и контроля параметров взаимодействия со средой?

33. Как оградить рабочую зону робота от доступа человека?

34. Перечислите источники прямой эффективности робототехники.

35. Перечислите источники косвенной эффективности робототехники.

36. Какие методы оценки целесообразности роботизации применяют в промышленности?

37. Чем метод оценки эффективности по минимуму приведенных затрат отличается от метода сопоставления затрат живого и овеществленного труда?

38. Приведите примеры живого труда в технологиях производства.

39. Приведите примеры овеществленного труда в технологиях производства.

40. От чего зависит уровень совершенства технологического процесса?

41. Как оценить целесообразность роботизации производства?

42. Как коэффициент производительности общественного труда связан с перераспределением затрат живого и овеществленного труда?

43. Как определить лимит затрат на роботизацию, минимальное повышение производительности, максимальное число рабочих в роботизированной технологии, оптимальный срок эксплуатации роботизированного оборудования?

ЗАДАЧИ

1. Постройте кинематическую схему руки человека как манипулятора. Определите число степеней подвижности. Постройте рабочую зону, выделите в ней зону обслуживания для процесса написания конспекта лекции. Рассчитайте примерные размеры рабочей зоны. Какие дополнительные степени подвижности могли бы расширить возможности руки человека как манипулятора?

2. Заданы размеры и относительные перемещения звеньев манипуляторов в цилиндрической, сферической и угловой системах координат (рис. 1.17):

- для цилиндрической системы координат —

$$r = 0,5\text{ м}, z = 1,0\text{ м}, \varphi = 30\text{ град.};$$

- для сферической системы координат —

$$r = 0,5\text{ м}, l = 1,0\text{ м}, \varphi_1 = 60\text{ град}, \varphi_2 = 30\text{ град.};$$

- для угловой системы координат —

$$l_1 = 1,0\text{ м}, l_2 = 0,5\text{ м}, l_3 = 0,5\text{ м}, \varphi_1 = 30\text{ град}, \varphi_2 = 60\text{ град}, \varphi_3 = 90\text{ град.}$$

Рассчитайте, в какую точку X_p, Y_p, Z_p пространства выйдет рабочий орган манипулятора.

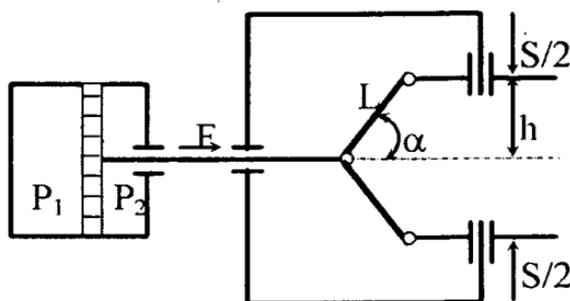


Рис. 1. Схема захватного устройства

3. Заданы координаты рабочего органа манипулятора: $X_p = 0,3$ м, $Y_p = 0,4$ м, $Z_p = 0,5$ м; размеры и перемещения звеньев: $l = 0,2$ м (для сферической системы координат), $l_1 = 0,4$ м, $l_2 = 0,5$ м, $l_3 = 0,5$ м; $\varphi_2 - \varphi_3 = 180$ град. (для угловой системы координат).

Рассчитайте относительные смещения звеньев манипулятора для перемещения рабочего органа в эту точку.

4. Рассчитайте размеры рабочей зоны манипуляторов в цилиндрической и прямоугольной системах координат, если длина любого звена — 0,5 м, относительные перемещения в соединениях звеньев: линейное — 0,5 м, вращательное — 120 град.

5. Захватное устройство с расстоянием в 100 мм между раскрытыми губками приводится в действие шаговым приводом с шагом 4 мм. Подача каждого импульса на шаговый привод после захвата детали увеличивает усилие захвата на 0,5 Н. С его помощью предполагается переносить объекты цилиндрической формы массой 2 кг и диаметром 50 мм.

Рассчитайте минимальное усилие захвата детали. Постройте зависимости между числом импульсов управления шаговым двигателем, раскрытием пальцев, усилием захвата.

6. Мембранный пневмопривод должен перемещать рычаг подачи газа робота-бульдозера на $x = 45$ мм от исходного положения. Рассчитайте наружный $2R$ и внутренний $2r$ диаметры плоской и тарельчатой мембран при условиях $r/R = 0,6x \leq 0,25R$ (плоская), $x \leq 0,5R$ (тарельчатая).

7. Неполноповоротный гидродвигатель имеет лопасть размером $0,1 \cdot 0,2$ м и работает при давлении 30 МПа с удельным расходом жидкости $1,4$ м³/об. Скорость поворота лопасти — 72 град/с. Какая мощность необходима для поворота лопасти на 60 градусов?

8. Рассчитайте ход штока и площадь поршня гидропривода захватного устройства, предназначенного для переноса объекта массой 1 кг и диаметром 50 мм

(рис. 1). Расстояние между раскрытыми пальцами 70 мм. Давление в штоковой полости — 0,8 МПа. Длина плеча захватного устройства — 50 мм.

9. Какую кинематическую схему манипулятора и какие размеры звеньев выбрать для обслуживания рабочей зоны размерами 0,5 · 0,7 · 1,0 м, находящейся на расстоянии 0,5 м от опоры манипулятора?

10. Рассчитайте диаметр вакуумного захватного устройства для переноски кинескопов массой 40 кг и размерами экрана 0,5 · 0,3 м.

11. Предложите конструкцию и рассчитайте параметры захватного устройства для рулонов ткани диаметром 300 мм, длиной 1000 мм, массой 25 кг при ограничениях: рулон мягкий, лежит в штабеле ориентированных рулонов, механические повреждения ткани не допускаются.

12. Мобильный манипулятор с захватным устройством, раскрытым на 0,2 м, удаляется от оператора, смещенного относительно оси движения на 2 м. Минимальный угол зрения оператора — 20 угловых минут. При каком удалении манипулятора оператор не сможет распознать состояние захватного устройства?

13. Опишите приложения манипуляторов с цикловой, позиционной и контурной системами программного управления в технологических процессах.

14. Постройте в предикатной и фреймовой формах описание двери для ее открывания манипуляционным роботом. Опишите процесс открывания экстенциональной семантической сетью.

15. В технологии холодной листовой штамповки манипуляционный робот обслуживает пресс: подает под поднятый пуансон заготовки из накопителя заготовок и переносит изделия в накопитель изделий (рис. 2). Для управления роботом вводятся двухпозиционные датчики: 1 — положения захватного устройства (открыто — закрыто); 2 — положения манипулятора у накопителя заготовок; 3 — положения манипулятора у накопите-

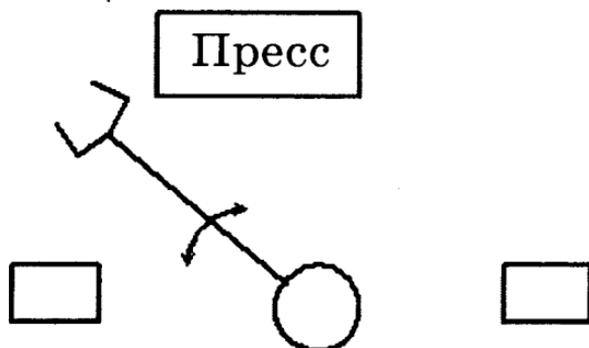


Рис. 2. Схема роботизированного технологического комплекса холодной листовой штамповки

ля изделий; 4 — верхнего положения пуансона прессы. Команды управления: 1 — повернуть манипулятор по часовой стрелке; 2 — повернуть манипулятор против часовой стрелки; 3 — закрыть захватное устройство; 4 — раскрыть захватное устройство; 5 — опустить пуансон; 6 — поднять пуансон. Составьте алгоритм управления технологическим комплексом «робот-пресс» в виде набора пар «ситуация — решение».

16. Рассчитайте минимальное количество элементов тактильной матрицы для распознавания тактильных образов круга, треугольника и прямоугольника.

17. Сколько рабочих требуется, чтобы обслуживать один станок 24 ч в сутки 365 дней за год с учетом праздничных и выходных дней, пересменок, внутрисменных простоев и прочих потерь, связанных с человеческим фактором. Сколько человек здесь заменит один робот, работающий 20 часов в сутки?

18. Для промышленного робота среднее время работы между отказами составляет 1 000 часов. Каждый отказ приводит к простоям около 16 часов. Какой коэффициент готовности робота? Коэффициент готовности — это отношение времени рабочего состояния

работа к годовому фонду рабочего времени, составляющему 4000 часов.

19. Пять роботов загружают и разгружают пять технологических машин с движущимся вдоль них конвейером. Технологический маршрут последовательно проходит через все пять установок. Время цикла обработки на каждой установке — 12 с, время загрузки — 5 с, разгрузки — 5 с. Какова производительность линии за 8-часовую смену?

20. Пять роботов загружают и разгружают пять установок, связанных общим конвейером. Технологический маршрут последовательно проходит через все пять установок. Время обработки на каждой установке — 12 с, время загрузки или разгрузки — 5 с. Отказ любого робота приводит к остановке всей линии на время устранения отказа. Средняя наработка робота на отказ — 1 000 ч, время устранения отказа — 16 ч. Оцените годовую производительность линии при отказе одного из роботов, если линия должна эксплуатироваться 800 рабочих смен по 8 часов в смену.

21. Пять роботов загружают и разгружают пять установок, работающих независимо друг от друга и связанных общим конвейером. Время между отказами одного робота — 1000 часов, время устранения отказа 16 часов. Годовой фонд рабочего времени робота — 4 000 часов. Какова годовая производительность системы при отказах одного робота?

22. Робот обслуживает пять установок, расположенных по окружности и последовательно обрабатывающих деталь. Время обработки на 1, 3 и 5 установках — по 10 с, на 2 и 4 установках — по 7 с. Время движения манипулятора между установками — 3 с, захвата или отпускания детали — 1 с. Рассчитайте производительность роботизированного комплекса.

23. Сколько станков по окружности может обслужить один робот, если время обработки детали на каж-

дом станке — 20 с, полное время обслуживания станка одним роботом — 4 с. Какова вероятность обслуживания одного станка роботом? Каков коэффициент использования робота?

24. Разработайте схему применения робота для автоматической установки радиоэлементов в заданные отверстия печатной платы: систему координат, кинематическую схему робота, компоновку робота, накопителя и платы, способ ориентации радиоэлементов, способ контроля правильности установки, алгоритм работы робота.

25. Реализуйте «Три закона безопасности робототехники» А. Азимова в конструкции робота-официанта.

26. Производительность базовой технологии $Q_0 = 20$ тыс. деталей в год, стоимость оборудования $K_0 = 200$ тыс. дол., срок службы оборудования $N_0 = 5$ лет, годовые затраты на материалы и энергию $\mathcal{E}_0 \cdot \Phi_0 = 5$ тыс. дол., годовые затраты на рабочую силу $\Phi_0 \cdot m_0 \cdot d_0 \cdot Z_{r0} = 30$ тыс. дол. Планируется внедрить роботизированную технологию с $Q = 60$ тыс. дет., $N = 3$ года, $K = 400$ тыс. дол., $\mathcal{E}_0 \cdot \Phi_0 = 6$ тыс. дол., $\Phi \cdot m \cdot g \cdot Z_r = 10$ тыс. дол. Будет ли целесообразно ее внедрение? Каков лимит затрат на роботизированное оборудование?

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Адаптивный робот (робот 2-го поколения) — имеет набор программ, которые переключаются по сигналам датчиков, контролирующих изменения среды.

Автономная навигация — ориентация робота с помощью бортовых устройств, оценивающих расстояния до препятствий.

Автоматическая система управления — система, в которой оператор не участвует в цикле управления объектом.

Адаптивное управление роботом — управление, при котором робот выбирает ту или иную программу автоматического управления в зависимости от сигналов датчиков.

Автоматизированное интерактивное управление — дистанционное управление, при котором часть операций рабочего цикла выполняется автоматически, а другая часть — оператором.

Анализ сцен — задача, в которой требуется восприятие взаимного расположения объектов на некоторой поверхности.

База данных — текущая информация об условиях функционирования робота.

База знаний — накапливаемая системой интеллектуального управления информация о среде функционирования робота.

Видеодатчик — устройство, преобразующее изображение объекта в электрическую форму.

Видикон — видеодатчик, формирующий объемный заряд на поверхности люминофора в зависимости от изображения объекта.

Волновой редуктор — устройство, содержащее генератор волн, гибкое зубчатое колесо и жесткое зубчатое колесо, предназначенное для снижения скорости электродвигателя при перемещении звена робота.

Гидропривод дроссельного управления — гидропривод, в котором направление потока рабочей жидкости изменяется гидрораспределителем.

Гидропривод объемного управления — гидропривод, в котором направление потока рабочей жидкости изменяется путем изменения направления вращения гидронасоса.

Датчик положения — устройство, формирующее выходной сигнал при прохождении объекта через определенную точку в пространстве.

Двустороннее копирующее управление — дистанционное управление, при котором измеряют нагрузки в звеньях манипулятора, в зависимости от которых изменяют сопротивление перемещению звеньев задающего устройства оператора.

Диалоговое интерактивное управление — дистанционное управление, при котором система управления формирует и предоставляет на выбор оператору варианты автоматического управления роботом.

Живой труд — труд людей, непосредственно занятых в технологическом процессе.

Захватное устройство манипулятора — рабочий орган, предназначенный для захвата, переноса и отпущения объекта манипулирования.

Зажимное захватное устройство — захватное устройство, в котором объект манипулирования удерживается за счет сил трения.

Звено манипулятора — часть манипулятора, перемещающаяся относительно предыдущего звена.

Зона обслуживания — часть рабочей зоны, в которой робот выполняет рабочие операции.

Интеллектуальный робот (робот 3-го поколения) — используя сигналы датчиков о внешней среде, робот создает и корректирует модель среды в соответствии с целью своего функционирования.

Информационный робот — робот, имитирующий и расширяющий возможности органов чувств человека.

Интегральный метод распознавания — построчная обработка всей информации об объекте распознавания и ее сопоставление с эталоном.

Информационная трасса — направляющая, вдоль которой без механического контакта ориентируется робокор в процессе движения.

Излучающий кабель — кабель с переменным током, проложенный вдоль траектории движения; на робокоре с помощью двух симметрично расположенных катушек принимают и сравнивают наводимое в них напряжение; в зависимости от результата сравнения подают сигнал поворота робокора.

Интеллектуальное управление — управление, при котором робот формирует программу управления в неизвестной среде, используя сигналы датчиков.

Информационный канал дистанционного управления — канал для передачи оператору информации о состоянии робота.

Избирательность машинного восприятия — способность выделить те детали объекта, которые существенны для решения поставленной задачи.

Индуктосин — вращающийся трансформатор с обмотками на печатной плате.

Измеритель перемещений — устройство, измеряющее перемещение объекта между точками в пространстве.

Комплектный электропривод — электропривод, объединенный с системой управления, обеспечивающей: поддержание постоянной скорости при изменении нагрузки, плавные переходные режимы, точную отработку управляющих воздействий, фиксацию вала при отключении питания.

Командное управление роботом — дистанционное управление, при котором оператор включает и отключает приводы в звеньях робота.

Копирующее управление — дистанционное управление, при котором оператор изменяет положение за-

дающего устройства, имеющего такую же кинематическую структуру, как манипулятор.

Контурное управление движением звена — управление, при котором полностью задают траекторию движения звена между начальной и конечной точками перемещения.

Константность машинного восприятия — формирование единого образа объекта независимо от расстояния до него, угла наблюдения и условий наблюдения.

Кодовый датчик (поворотный шифратор) — устройство, содержащее диск светодиодов и диск фотодиодов, между которыми поворачивается кодовый диск с прорезями, связанный с перемещающимся объектом.

Круговая компоновка РТК — компоновка, при которой технологическое оборудование размещено по окружности, в центре которой находится робот.

Классификационный метод распознавания — выделение набора существенных признаков объекта и его сравнение с набором, заложенным при обучении распознаванию.

Логическая модель представления знаний — обобщенные знания о среде в виде набора логических связей между элементами среды.

Локационный датчик — датчик для бесконтактного измерения расстояний до объектов.

Линейная компоновка РТК — компоновка, при которой линия роботов параллельна линии технологических машин.

Манипуляционный робот — робот, выполняющий операции по переносу объектов манипулирования из одной точки пространства в другую.

Мембранная камера — пневмопривод, представляющий собой мембрану, закрепленную между двумя тарельчатыми дисками, причем к центру мембраны прикреплен шток, выступающий из камеры.

Мобильный робот — робот для перевозки грузов по заданной траектории.

Мехатроника — раздел техники, в котором точные механизмы перемещений управляются электронными устройствами.

Обратная задача кинематики манипулятора — расчет взаимных перемещений звеньев при заданном положении рабочего органа в пространстве.

Одностороннее копирующее управление — дистанционное управление, при котором оператор не получает информацию о нагрузках в звеньях манипулятора.

Ориентирующее устройство — устройство для одинаковой ориентации деталей перед их подачей в позицию захвата роботом.

Овеществленный труд — труд людей, материализовавшийся в изготовленных ими предметах.

Пантограф сбалансированного манипулятора — соединение звеньев в виде параллелограмма с целью уравнивания нагрузок на рабочем органе.

Пневмоцилиндр — устройство, штоком перемещающее звено робота при подаче сжатого воздуха в штоковую или поршневую полости.

Погрешность позиционирования — максимальное отклонение рабочего органа от точки, заданной программой управления. **Погрешность обработки траектории** — максимальное отклонение фактической траектории движения рабочего органа от траектории, заданной управляющей программой.

Притяжное захватное устройство — захватное устройство, в котором объект манипулирования удерживается за счет сил притяжения.

Поддерживающее захватное устройство — захватное устройство, в котором объект манипулирования удерживается путем его поддерживания снизу.

Позиционное управление движением звена — управление, при котором задают не только начальную и конечную точки перемещения звена, но и промежуточные точки, через которые должно проходить звено робота.

Полуавтоматическое копирующее управление — дистанционное управление, при котором оператор управляет роботом с помощью рукоятки со многими степенями подвижности.

Поколение робота — уровень представления о внешней среде в процессе работы робота.

Потенциометр — устройство, изменяющее сопротивление протеканию электрического тока в зависимости от положения подвижного электрода (движка) между двумя неподвижными электродами.

Привод звена манипулятора — электрическое, пневматическое или гидравлическое устройство, обеспечивающее перемещение одного звена относительно другого.

Производительность общественного труда — изменение соотношения между затратами живого и овеществленного труда до и после усовершенствования технологического процесса.

Промышленный компьютер — персональный компьютер для управления технологическим оборудованием в жестких условиях эксплуатации.

Программируемый логический контроллер — программируемое устройство управления, входы которого соединены с датчиками на объекте, выходы — с исполнительными устройствами, а логическая связь датчиков с выходными командами реализована путем записи программы в перепрограммируемое запоминающее устройство контроллера.

Пьезоэлектрический силомоментный датчик — пьезокерамический элемент, на поверхности которого образуется электрический заряд при приложении к нему механических усилий.

Прямое обучение робота — вид обучения, при котором система управления записывает перемещения звеньев робота, осуществляемые оператором, а в режиме управления повторяет эти перемещения.

Проблемно-ориентированное программирование — составление программы выполнения действий над некоторыми объектами.

Преобразование сцен — задача планирования и исполнения действий, в которой задают начальное и конечное состояния системы; интеллектуальный робот должен сформировать последовательность действий по переводу системы из начального в конечное состояние.

Прагматические знания — знания, отображающие информацию об объекте с позиции решаемой интеллектуальным роботом задачи.

Программное управление — управление, при котором отсутствует контроль среды функционирования робота.

Прямая задача кинематики манипулятора — расчет положения рабочего органа в пространстве при заданных взаимных перемещениях звеньев манипулятора.

Прямоугольная система координат — система координат манипулятора, содержащего три поступательных соединения звеньев.

Программный робот (робот 1-го поколения) — датчики представления о внешней среде отсутствуют и робот не изменяет свое поведение при изменении среды.

Разомкнутое управление — управление, при котором выходная величина однозначно соответствует сигналу управления.

Распознавание образов — задача, в которой требуется распознать неизвестный объект по обобщенному описанию аналогичных объектов, показанных при обучении.

Робото-ориентированное программирование — составление программы управления роботом на специализированном языке.

Роботизированный технологический комплекс (РТК) — автономно действующая совокупность технологической машины, робота и вспомогательного оборудования, в которой обеспечивается автоматическое выполнение технологического процесса.

Степень подвижности — плоскость, в которой одно звено манипулятора перемещается относительно другого звена в прямом и обратном направлениях.

Струйный пневмопривод — устройство, регулирующее положение штока пневмоцилиндра путем подачи сжатого воздуха в штоковую или поршневую полости в зависимости от рассогласования заданного и фактического положений штока.

Следящий привод — привод, управляемый в зависимости от рассогласования заданного и фактического параметров.

Сбалансированный манипулятор — вручную управляемый манипулятор для манипулирования тяжелыми грузами.

Структурный метод распознавания — распознавание объекта по его характерным признакам, например, площади или периметру.

Сферическая система координат — система координат манипулятора, содержащего два вращательных и одно поступательное соединения звеньев.

Светоотражающая полоса — проложенная вдоль траектории движения полоса, на которую направляется свет с робокара; ориентация движения вдоль полосы осуществляется путем сравнения отраженного света приемниками света, симметрично расположенными на робокаре.

Супервизорное интерактивное управление — дистанционное управление, при котором оператор подает укрупненные команды, по которым выполняются подпрограммы автоматического управления роботом.

Синтаксические знания — знания, отображающие структуру информации об объекте.

Семантические знания — знания, отображающие смысл информации об объекте.

Система восприятия — набор датчиков для получения информации о среде функционирования робота.

Система представления знаний — набор сведений о постоянных закономерностях среды функционирования интеллектуального робота, целях функционирования робота, виде среды функционирования ро-

бота, использовании текущей информации для пополнения базы знаний о среде функционирования робота.

Система планирования и исполнения действий — формирование и реализация программы воздействий робота на среду, ведущей к достижению поставленной цели.

Сетевая модель представления знаний — обобщенные знания о среде в виде сети, связывающей объекты или факты отношениями.

Семантическая сеть — сетевая модель представления знаний, связывающая объекты или факты смысловыми отношениями.

Сенсор — датчик признаков внешней среды или состояния робота.

Сельсин — электрическая машина переменного тока с однофазной обмоткой на роторе и трехфазной обмоткой на статоре, в которой наводится напряжение, зависящее от угла поворота ротора.

Силовой датчик — датчик для измерения усилий и моментов в соединениях звеньев манипулятора.

Система технического зрения — устройство, осуществляющее распознавание изображения объекта по его электрическому представлению.

Синтаксический метод распознавания — описание объекта на языке формальной грамматики и синтаксический анализ полученных предложений.

Тактильный датчик — датчик, реагирующий на прикосновение к объекту.

Тактильная матрица — упорядоченный набор тактильных датчиков, реагирующих на прикосновение к объекту; совокупность сигналов датчиков соответствует тактильному образу объекта.

Тензорезистор — высокоомный проводник малого сечения, уложенный прямоугольными витками и наклеенный на поверхность, деформируемую под действием приложенного усилия.

Транспортный робот (робокар) — автоматически управляемая тележка (AGV — *Automated Guided Vehicle*) для перевозки грузов между заданными точками.

Управляющий робот — робот, имитирующий процессы принятия решений человеком при управлении работой высокоскоростного оборудования.

Угловая система координат — система координат манипулятора, содержащего три вращательных соединения звеньев.

Управление с компенсацией возмущений — управление, при котором измеряют возмущение, действующее на объект, и изменяют сигнал управления в зависимости от величины возмущения.

Управление с обратной связью — управление, при котором изменяют сигнал управления в зависимости от рассогласования заданной и фактической выходных величин объекта.

Управляющий канал дистанционного управления — канал для передачи роботу команд оператора.

Уровень адаптации — степень учета влияния внешней среды и объекта управления при изменении алгоритма управления объектом.

Углеволокно — волокно из углеродных нитей, через которые проходит электрический ток.

Ультразвуковой метод локации — метод измерения расстояний, при котором сравнивают прямой и отраженный от границы раздела сред сигналы.

Универсальный логический модуль — несложное управляющее устройство, на передней панели которого технолог записывает программу управления объектом.

Фрейм — сетевая модель представления знаний в виде предельно обобщенной структуры класса распознаваемых объектов.

Цилиндрическая система координат — система координат манипулятора, содержащего одно вращательное и два поступательных соединения звеньев.

Человеко-машинная система управления — система, в которой оператор участвует в каждом цикле управления объектом.

Электропривод робота — устройство, осуществляющее перемещение звена робота при подаче электрического напряжения.

Эластомерный датчик — датчик с упругим материалом, внутри которого распределен проводящий порошок.

Эталонный метод распознавания — поточечное сравнение распознаваемого объекта с эталонным изображением.

Flex Picker — система координат манипулятора, в которой одни концы шарнирных звеньев связаны с роторами шаговых двигателей, а другие соединены вместе.

SCARA — система координат манипулятора, в которой звенья поворачиваются друг относительно друга в горизонтальной плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robotics Industry Directory. Ed: Robotic Industries Association. 2004, 139 p.

2. *Юревич, Е.И.* Основы робототехники: уч. пособие. 2-е изд. — СПб : BHV, 2004 — 420 с.

3. Mechatronik in Theory und Praxis / Bosch AT-didactic, 1999, 318 S.

4. *Козырев Ю.Г.* Промышленные роботы. Справочник — М: Машиностроение, 1988. — 392 с.

5. *Скотт П.* Промышленные роботы — переворот в производстве. — Пер. с англ. — М: Экономика, 1987. — 304 с.

6. *Марш П.* Не счесть у робота профессий. Под ред. В.С.Гурфинкеля — М.: Мир, 1987. — 182 с.

7. *Колпашников С.Н., Челпанов И.Б.* Схемы и конструкции схватов промышленных роботов. — М: ВНИИ-ТЭМР, 1988, Сер.1. Вып.3. — 52 с.

8. *Владов И.Л. и др.* Сбалансированные манипуляторы. — М.: Машиностроение, 1988. — 264 с.

9. *Накано Э.* Введение в робототехнику. — М: Мир, 1988. — 334 с.

10. *Конюх В.Л.* Шахтная робототехника. — Кемерово: Кузбассвузиздат, 2000. — 336 с.

11. *Афонин В.Л., Макушкин В.А.* Интеллектуальные робототехнические системы. — М.: Интернет — университет информационных технологий. — 2005. — 208 с.

12. *Кузин Л.Т.* Основы кибернетики. В 2-х т. Т.2. Основы кибернетических моделей. — М.: Энергия, 1979 — 584 с.

13. *Макаров И.М.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы автоматического управления. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Наука, Физматгиз. — 2001. — 333 с.

14. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем. — М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. — 2005. — 383 с.

15. *Конюх В.Л.* Опыт оцувствления подземных транспортных роботов. IV Всесоюзное совещание по робототехническим системам. — Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР — 1987. 277–278 с.

16. *Брагин В.Б. и др.* Системы оцувствления и адаптивные промышленные роботы. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.

17. *Конюх В.Л., Юровская М.А.* Стоимостная оценка социальных характеристик труда шахтера. Уголь. — 1990. — № 5. — 38–39 с.

18. *Конюх В.Л.* Прогнозирование сложности управления шахтным роботом. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1987. — № 2. — 57–61 с.

19. *Конюх В.Л., Игнатъев Я.Б.* Обеспечение работы роботизированной сборочной линии при отказе робота. Сборка в машиностроении, приборостроении, 2003. — № 9. — 24–27 с.

20. *Конюх В.Л.* Гибкие производственные системы: учеб. пособие. — Кемерово: КемГУ, 1993. — 75 с.

21. *Питерсон Д.* Теория сетей Петри и моделирование систем. — М.: Мир, 1984. — 379 с.

22. *Андрианов Ю.Д. и др.* Робототехника. — М: Машиностроение, 1984. — 288 с.

23. *Конюх В.Л.* Управление подземными погрузочно-транспортными машинами с поверхности / В.Л. Конюх, Р.А. Рамазанов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2004. — № 4. — 61–66 с.

24. *Конюх В.Л.* Приложение робототехники в горном деле: база данных для технологов / В.Л. Конюх // Горный вестник. — 1996. — № 2. — 58–61 с.

25. *Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.* Основы управления манипуляционными роботами: учеб. пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 479 с.

26. *Подураев Ю.В.* Мехатроника: основы, применение: учеб. пособие. 2-е изд. — М.: Машиностроение, 2007. — 256 с.

27. *Волчкович Л.Н.* Роботы и здравый смысл. Изобретатель и рационализатор. — 1986. — № 4. — 2–3 с.

28. *Жуков Л.И., Гендлер Г.Х., Ловков В.А.* Оценка эффективности внедрения нового автоматизированного оборудования. // *Механизация и автоматизация производства.* — 1985. — 31–43 с.

29. *Шаумян Г.А.* Комплексная автоматизация производственных процессов. — М: Машиностроение, 1973. — 640 с.

Учебное издание.

Владимир Леонидович Конюх

ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ

Ответственные редакторы:	<i>А. Михайленко</i>
Редактор:	<i>Н. Казакова</i>
Технический редактор:	<i>Г. Логвинова</i>
Корректор:	<i>Е. Ковалева</i>
Верстка:	<i>Е. Аликберов</i>
Макет обложки:	<i>М. Сафиуллина</i>

Сдано в набор 16.08.2007 г. Подписано в печать 17.09.2007 г.

Формат 84x108 1/32. Бумага типографская № 2.

Гарнитура Школьная.

Тираж 3 000.

Заказ № 709.

ООО «Феникс»

344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80,

e-mail: kazakova-fenix@mail.ru,

тел. (863) 261-89-60, тел./факс (863) 261-89-50

Отпечатано с готовых диапозитивов в ЗАО «Книга».

344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Советская, 57.

Качество печати соответствует предоставленным диапозитивам.



Издательство
еникс

344082, г. Ростов-на-Дону,
пер. Халтуринский, 80
Тел.: (863) 261-89-50;
www.phoenixrostov.ru

Приглашаем к сотрудничеству АВТОРОВ для издания:

- ❖ учебников для ПТУ, ссузов и вузов;
- ❖ научной и научно-популярной литературы по МЕДИЦИНЕ и ВЕТЕРИНАРИИ, ЮРИСПРУДЕНЦИИ и ЭКОНОМИКЕ, СОЦИАЛЬНЫМ и ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ;
- ❖ литературы по ПРОГРАММИРОВАНИЮ и ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ; ПРИКЛАДНОЙ и ТЕХНИЧЕСКОЙ литературы;
- ❖ литературы ПО СПОРТУ и БОЕВЫМ ИСКУССТВАМ;
- ❖ ДЕТСКОЙ и ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ литературы;
- ❖ литературы по КУЛИНАРИИ и РУКОДЕЛИЮ.

**ВЫСОКИЕ ГОНОРАРЫ И
ВСЕ финансовые ЗАТРАТЫ БЕРЕМ НА СЕБЯ !!!**

При принятии рукописи в производство
ВЫПЛАЧИВАЕМ гонорар НА 10%
ВЫШЕ ЛЮБОГО РОССИЙСКОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА!!!

Рукописи не рецензируются и не возвращаются!

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ:

Михайленко Александр Васильевич

Тел.: (863) 261-89-60; E-mail: torg147@phoenixrostov.ru

torg147@aaanet.ru, kazakova-fenix@mail.ru

Издательство «Феникс»

Отдел оптовых продаж

344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80
Контактные телефоны: (863) 261-89-53, 261-89-54,
261-89-55, 261-89-56, 261-89-57, факс 261-89-58

Начальник отдела Родионова Татьяна Александровна
e-mail: torg152@phoenixrostov.ru

Заместитель начальника отдела Мезинов Антон Николаевич
e-mail: torg151@phoenixrostov.ru

**Менеджер по продажам на территории Москвы,
Центра европейской части России и республики Казахстан**
Чермантеева Татьяна Степановна
e-mail: torg155@phoenixrostov.ru

Менеджер по продажам на территории Урала и Северо-Запада
Хомуецкая Екатерина Владимировна
e-mail: torg153@phoenixrostov.ru

Менеджер по продажам на территории Сибири
Шейгец Александр Владимирович
e-mail: torg154@phoenixrostov.ru

**Менеджер по продажам на территории ближнего
и дальнего зарубежья**
Ярута Игорь Игоревич
e-mail: torg150@phoenixrostov.ru

Менеджер по продажам
Горбаченко Мария Павловна
e-mail: torg103@phoenixrostov.ru

Менеджер по продажам на территории Дальнего Востока
Штокалов Кирилл Гениевич
e-mail: kgs@phoenixrostov.ru

Менеджер по работе с бюджетными организациями
Гордеева Ольга Олеговна
e-mail: torg180@phoenixrostov.ru

Менеджер по работе с бюджетными организациями
Франк Татьяна Викторовна
e-mail: ural@aaanet.ru

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА

Москва

ул. Космонавта Волкова, д. 25/2, 1-й этаж
тел.: (495) 156-05-68, 450-08-35; e-mail: fenix-m@yandex.ru
Директор: Моисеенко Сергей Николаевич

Шоссе Фрезер, 17, район метро «Авиамоторная»
тел.: (495) 517-32-95; тел/факс: (495) 789-83-17
e-mail: mosfen@pochta.ru, mosfen@bk.ru
Директор: Мячин Виталий Васильевич

Торговый Дом «КноРус»

ул. Б. Переяславская, 46. Тел.: (495) 680-02-07, 680-72-54,
680-91-06, 680-92-13; e-mail: phoenix@knorus.ru

Санкт-Петербург

198096, г. Санкт-Петербург, ул. Кронштадская, 11, офис 17
тел.: (812) 335-34-84; e-mail: fmx.spb@mail.ru
Директор: Стрельникова Оксана Борисовна

Екатеринбург

620085, г. Екатеринбург, ул. Сухоложская, д. 8
тел.: (343) 255-11-27; e-mail: bookva@isnet.ru
Директор: Подунова Наталья Александровна

Челябинск

ООО «Интер-сервис ЛТД»,
454036, г. Челябинск, Свердловский тракт, 14
тел.: (351) 721-34-53; e-mail: zakup@intser.ru
Менеджер: Морозов Александр

Новосибирск

ООО «ТОП-Книга», г. Новосибирск, ул. Арбузова, 1/1
тел.: (3832) 36-10-28, доб. 1438; e-mail: phoenix@top-kniga.ru
Менеджер: Михайлова Наталья Валерьевна

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА

Украина

ООО ИКЦ «Кредо», г. Донецк, ул. Куйбышева, 131
тел.: +38 (8062) 345-63-08, 348-37-91, 348-37-92,
345-36-52, 339-60-85, 348-37-86; e-mail: moiseenko@skif.net
Моисеенко Владимир Вячеславович

НИЖНИЙ НОВГОРОД (Верхнее Поволжье)

Нижний Новгород, Мещерский Бульвар 5, кв. 238
тел./ факс: (8312)-77-48-70; e-mail: fenixn@ Rambler.ru
Директор: Коцуба Вячеслав Вячеславович

САМАРА (Нижнее Поволжье)

Самара, ул. Товарная 7 «Е» (территория базы «Учебник»)
тел.: (846)-951-24-76; e-mail: fenixma@mail.ru
Директор: Митрохин Андрей Михайлович

КРАСНОДАР (Южный Федеральный Округ)

Краснодар, ул. им. Гудимы 61
тел.: (861)-274-30-11, 272-08-69; e-mail: yugkniga@mail.ru
Директор: Черкашин Сергей Сергеевич

**Вы можете получить книги издательства
«Феникс» по почте, сделав заказ:**

344082 г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский 80,
издательство «Феникс», «Книга-почтой»,
Лоза Игорю Викторовичу, тел. 8-909-4406421,
e-mail: tvoyakniga@mail.ru

Серия «Высшее образование»

Болезни суставов

В учебном пособии освещается современное состояние проблемы заболеваний суставов. Изложены этиология, патогенез, клиническая картина, методы диагностики и схемы лечения наиболее распространенных заболеваний, сопровождающихся суставным синдромом. Большое внимание уделено проблемам физической реабилитации.

Может быть использовано студентами старших курсов медицинских вузов при изучении ревматологии по программе по внутренним болезням и на элективном курсе по ревматологиям.