

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачёва»

Н. П. Курьшкин

Основы робототехники

Рекомендовано в качестве учебного пособия
учебно-методической комиссией специальности
220301 «Автоматизация технологических процессов и
производств (в машиностроении)»

Кемерово 2011

Рецензенты:

Ермак В. Н., доцент кафедры прикладной механики

Полетаев В. А., председатель УМК специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)»

Курышкин Николай Петрович. Основы робототехники: учеб. пособие [Электронный ресурс]: для студентов очной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)» / Н. П. Курышкин. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); зв.; цв.; 12 см. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows 95; (CD-ROM-дисковод); мышь. – Загл. с экрана.

Рассмотрена история развития робототехники, классификация и технические характеристики современных промышленных роботов, методы структурного, кинематического и динамического анализа и синтеза манипуляторов промышленных роботов. Изложены устройство и принципы работы сервомеханизмов роботов, методы программирования роботов, а также их технологическое применение.

© ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва»

© Курышкин Н. П.

Предисловие

Бурное развитие робототехники за последние десятилетия ассоциируется с развитием человеческой цивилизации в целом. Роботы проникают во все сферы деятельности человека. Ставшее традиционным применение роботов в машиностроении и приборостроении требует от инженеров знаний основ проектирования и эксплуатации этих автоматических машин.

Главная цель данного учебного пособия – формирование у будущих инженеров общекультурных и профессиональных компетенций в области автоматизации технологических процессов и производств в машиностроении средствами робототехники.

С этой целью в пособии особое внимание уделено решению задач структурного, кинематического и динамического анализа и синтеза механической части промышленных роботов – манипуляторов. В книге раскрыты принципы преобразования управляющих сигналов в конкретные перемещения звеньев манипуляторов. Описаны проблемы роботизации и пути их решения на действующих машиностроительных производствах, начиная с анализа существующих технологических процессов и заканчивая проектированием вспомогательного оборудования и разработкой компоновок робототехнических комплексов.

Каждая из восьми глав учебного пособия заканчивается контрольными вопросами, отвечая на которые студенты вырабатывают необходимые компетенции. При затруднениях в ответах на поставленные вопросы необходимо более внимательно прочитать соответствующую главу. Наиболее важные понятия, определения и выводы выделены в тексте *курсивом*. Пособие не только не исключает, но и предполагает использование другой учебной литературы, которая указана в конце книги.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам за труд по прочтению рукописи и весьма полезные замечания, высказанные при её рецензировании.

Введение

Автоматизация машиностроительного производства является одним из главных направлений научно-технического прогресса промышленности в целом. Требования Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по машиностроительным направлениям подготовки бакалавров предполагают формирование профессиональных компетенций. Суть их заключается в первую очередь в способности бакалавра техники и технологий «использовать основные закономерности процессов изготовления машиностроительной продукции для производства изделий требуемого качества при наименьших затратах общественного труда (ПК-1)», выбирать и проектировать средства автоматизации и управления (ПК-5, ПК-12, ПК-19).

Использование промышленных роботов позволяет в сочетании с автоматизированным технологическим оборудованием создавать безлюдные технологии. Робот представляет собой автоматическую машину, выполняющую механические перемещения, подобные тем, которые совершает человек, выполняющий физическую работу¹. По своей структуре он состоит из двух частей: системы управления и исполнительных органов. Система управления – это управляющий компьютер, а исполнительные органы – механические руки и устройство передвижения (если робот мобильный). В связи с этим, изучению курса основ робототехники должно предшествовать изучение информатики и основ программирования, теоретической механики и теории механизмов и машин, основ электротехники и электроники, теории автоматического управления. Для изучения технологического применения промышленных роботов необходимо знать основные технологические процессы машиностроительного производства.

Изучив курс основ робототехники, студент будет знать структуру, технические характеристики, области применения, устройство и принципы работы промышленных роботов, получит навыки их программирования, научится решать основные задачи кинематики и динамики манипуляторов, необходимые при проектировании роботов и робототехнических систем.

¹ – подробнее см. раздел 1.2.

² – (ок. I века н. э.) древнегреческий учёный, дал систематическое изложение ос-

1 Что такое робот?

В обыденном понимании ответ на этот вопрос будет звучать так: робот – это железный человек. Да, действительно первые роботы человек создал по своему образу и подобию. Однако с течением времени и сами роботы и их определение коренным образом изменились. Разберёмся в этом вопросе более детально.

1.1 История развития робототехники

Первое упоминание в мифах о «живых» существах, созданных человеком – медном великане по имени Талос – датируется III веком до н.э. Все эти мифические существа обладали тремя существенными способностями:

- были наделены фантастической физической силой, способностью летать, жить под землёй или в воде;
- они беспрекословно подчинялись воле человека;
- выполняли за человека самую тяжёлую и изнурительную работу.



Рис. 1.1 Робот Монах, 1560 г.

Дошедшие до нас достоверные сведения о механических людях относятся к I веку нашей эры и связаны с именем Герона Александрийского². Этот известный механик сконструировал устройство, с помощью которого «оживали» статуи богов, установленных в храме Деонисия. Стоило только на жертвеннике храма запылать огню, как фигуры бога Дионисия и его жены Ариадны начинали двигаться.

Впервые слово «*робот*»

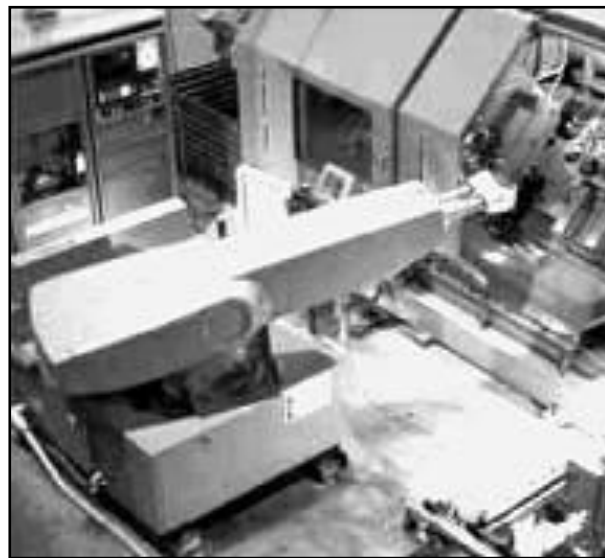
² – (ок. I века н. э.) древнегреческий учёный, дал систематическое изложение основных достижений античного мира по прикладной механике и математике, изобрёл ряд приборов и устройств. Является автором формулы расчёта площади треугольника по трём его сторонам.

(в переводе с чешского языка – «работник») появилось в фантастической пьесе писателя Карела Чапека³ в 1920 году. Пьеса называлась «Р.У.Р.» – Россумские универсальные роботы. В этой пьесе механические человекоподобные существа – роботы – выполняли за людей тяжёлую работу. Спустя семь лет американский инженер Дж. Венсли сконструировал первый в мире робот «Телевокс». Он был похож на человека и мог выполнять элементарные движения по команде человека и говорить несколько фраз. В 1937 году на Всемирной выставке в Париже был продемонстрирован подвижный радиоуправляемый робот, созданный российским школьником В. Машкевичем.

Таким образом, до начала шестидесятых годов 20-го века все создаваемые человеком роботы – «андроиды» были игрушками или выполняли рекламную функцию (рис. 1.1).



а)



б)

Рис. 1.2 Первые промышленные роботы: а) – «Версатран», 1960 г.; б) – «Юнимейт», 1962 г.

Первые же *промышленные* роботы появились в США в начале шестидесятых годов. Они были сконструированы и изготовлены на фирмах «Версатран» и «Юнимейт» (рис. 1.2) и применя-

³ – (1890 – 1938), чешский писатель, автор социально-фантастических произведений в духе антиутопии: пьесы «R. U. R.» (1920), «Средство Макропулуса» (1922), романы «Фабрика Абсолюта» (1922), «Кракатит» (1924). Роман «Война с саламандрами» (1936) – сатирическое обличение фашистских расовых теорий.

лись на операциях сборки и загрузки станков на заводах Дженерал Моторс, Форд, Дженерал Электрик.

Далее производство роботов приобрело лавинообразный характер. Так в 1967 году по лицензии США стали изготавливать промышленные роботы в Англии. В 1968 г. – в Швеции и Японии (по лицензии США). В 1971 г. – в ФРГ, в 1972 г. – во Франции, в 1973 г. – в Италии. Подробнее историю развития робототехники см. на сайте myrobot.ru/articles/hist.php.

Дальнейшая динамика роста мирового парка промышленных роботов представлена на диаграмме (рис. 1.3).

Следует отметить, что, начиная с 80-х годов прошлого столетия, половина парка промышленных роботов приходится на Японию. Там работа в области робототехники возведена в ранг государственной программы, субсидируемой из государственного бюджета. Поэтому на сегодняшний день Япония занимает лидирующее положение в мире по научным разработкам в области робототехники, производству и применению промышленных роботов.

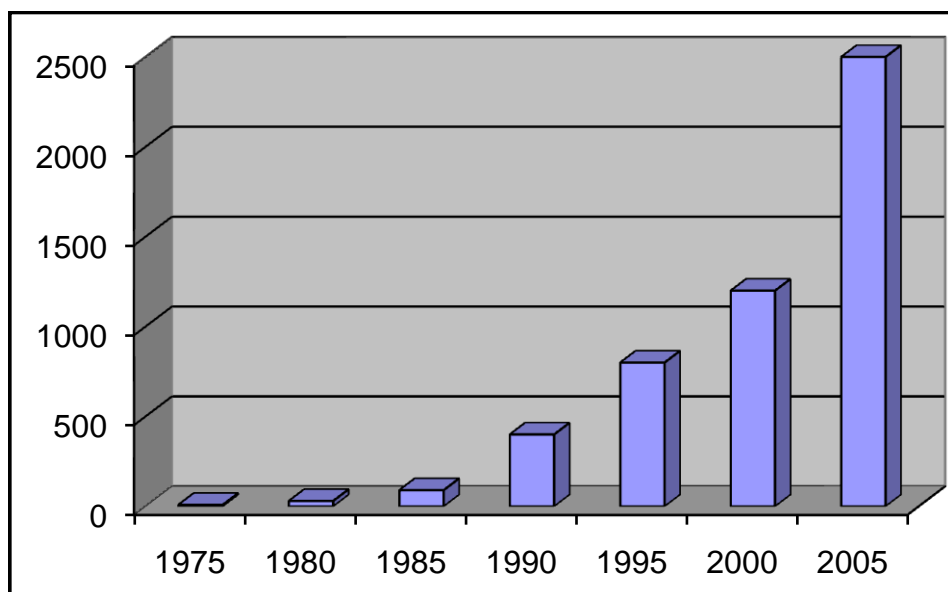


Рис. 1.3 Динамика роста мирового парка промышленных роботов, тыс. шт.

В СССР практическое применение роботов началось в середине 60-х годов прошлого столетия. В 1966 году в Воронеже (институт ЭНИКмаш) был разработан первый автоматический манипулятор для переноса и укладки металлических листов. В

1968 году был создан первый управляемый от ЭВМ подводный манипулятор (Институт океанологии АН СССР). В 1971 году в СССР появились первые промышленные роботы УМ – 1, «Универсал – 50», УПК – 1. Начиная с 1972 года, работы в области робототехники приняли плановый характер. Было создано более 100 марок промышленных роботов и организовано серийное производство 40 марок [1].

К концу 1980 г. парк промышленных роботов в стране превысил 6000 шт. (на уровне парка роботов США) и составлял более 20% мирового парка роботов, а к 1985 г. превысил 40 тыс. шт., достигнув 40% мирового парка [2].

С распадом СССР вся работа по развитию отечественной робототехники была прервана. Прекратилось серийное производство роботов. Их парк сократился более чем на порядок. Однако с началом двадцать первого столетия начали возрождаться научно-технические программы по робототехнике, начал восстанавливаться парк роботов в промышленности. Всё это позволяет прогнозировать в ближайшее время возрождение отечественной робототехники по мере восстановления российской экономики.

1.2 Робототехника и роботы

Впервые понятие «робототехника» ввёл Айзек Азимов⁴ в 1940 г. *Робототехника* – наука о проектировании, изготовлении и использовании роботов. Он же в своём сборнике фантастических рассказов «Я, робот» сформулировал три закона робототехники:

- 1) робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинён вред;
- 2) робот должен повиноваться командам человека, если эти команды не противоречат первому закону;
- 3) робот должен заботиться о своей безопасности, пока это не противоречит первому и второму законам.

⁴ – (1920 – 2009), американский писатель-фантаст, популяризатор науки. Серия романов, в том числе «Фундамент и империя» (1952), «Грань Фундамента» (1982), «Фундамент и Земля» (1986) о крушении галактической империи и рождении нового общественного строя. Центральная тема романа «Сами боги» (1972) – рационализм без нравственности ведёт ко злу.

Сформулированные Айзеком Азимовым законы на протяжении многих лет не только цитируются специалистами-робототехниками в научных публикациях, но им следуют при создании новых типов роботов. Эти законы носят всеобщий методологический характер.

Следуя за Айзеком Азимовым известный в области робототехники американский специалист Шимон Ноф в 1985 году сформулировал три закона использования роботов [1]:

1) роботы должны заменять людей на опасных работах (и этим оправдываются все затраты);

2) роботы должны заменять людей на работах, которые люди не хотят делать (и этим также оправдываются все затраты);

3) роботы должны заменять людей на работах, которые они могут выполнять с меньшими затратами (на первых порах это лишит многих привычных преимуществ, но в конечном итоге все затраты оправдываются так же, как при выполнении двух первых законов).

В этих законах обобщён мировой двадцатипятилетний опыт создания и использования промышленных роботов. Развитию робототехники с начала шестидесятых годов прошлого столетия имелись объективные предпосылки. Они заключались в следующем.

1. К этому времени произошло насыщение рынка товаров развитых стран, сопровождающееся расширением потребностей, необходимостью быстрого изменения ассортимента изделий и перехода от принципа «сделано – продано» к принципу «производить только то, что нужно, тогда, когда нужно и столько, сколько нужно».

Отсюда вытекает вторая объективная предпосылка:

2. Назрела необходимость сокращения цикла изготовления изделия и перехода к гибкому производству. Универсальность робототехники в сочетании с автоматизированной подготовкой производства позволила оперативно перестраивать оборудование при изменении номенклатуры изделий.

3. Рост стоимости рабочей силы. Часовая оплата рабочего в США с 60-х годов превысила стоимость часа работы робота и росла на 10 – 15% в год при росте стоимости часа работы робота на 2 – 3% в год.

4. Дефицит рабочих на тяжёлых, монотонных и опасных работах. Это привело к росту оплаты неквалифицированного труда и компенсаций, связанных с травматизмом.

5. Необходимость повышения производительности труда на вспомогательных операциях. Рост производительности основного оборудования не приводит к росту выпуска изделий из-за медленного выполнения человеком вспомогательных операций. Робот способен работать быстро и без перерывов. Его применение в сочетании со средствами автоматизации повышает производительность серийного производства в среднем на 50%.

6. Необходимость повышения качества продукции, экономии материалов и энергии позволяет стабилизировать технологические режимы и снизить процент брака. Так, например, использование роботов на операции окраски кузовов автомобилей позволило сэкономить 50% краски. Роботу не требуется освещение, кондиционирование воздуха, тепло, спецодежда и средства охраны труда.



а)



б)

Рис. 1.4 Современные роботы-андроиды: а) – робот «Asimo» японской корпорации Honda; б) – робот «BN-7» корейской компании Bandai.

Опыт последних лет говорит о том, что роботы из машиностроительной области начинают всё более проникать в другие отрасли производства – горное дело, металлургию, строительство, лёгкую и пищевую промышленность. Большими темпами растёт доля парка роботов, занятых вне промышленности – в военном деле, в сфере бытового обслуживания, в медицине, в индуст-

рии развлечений и т. д. На рис. 1.4 представлены образцы современных роботов-андроидов, способных перемещаться по лестницам, обходить препятствия, вести диалог с человеком, выполнять различные сервисные функции.

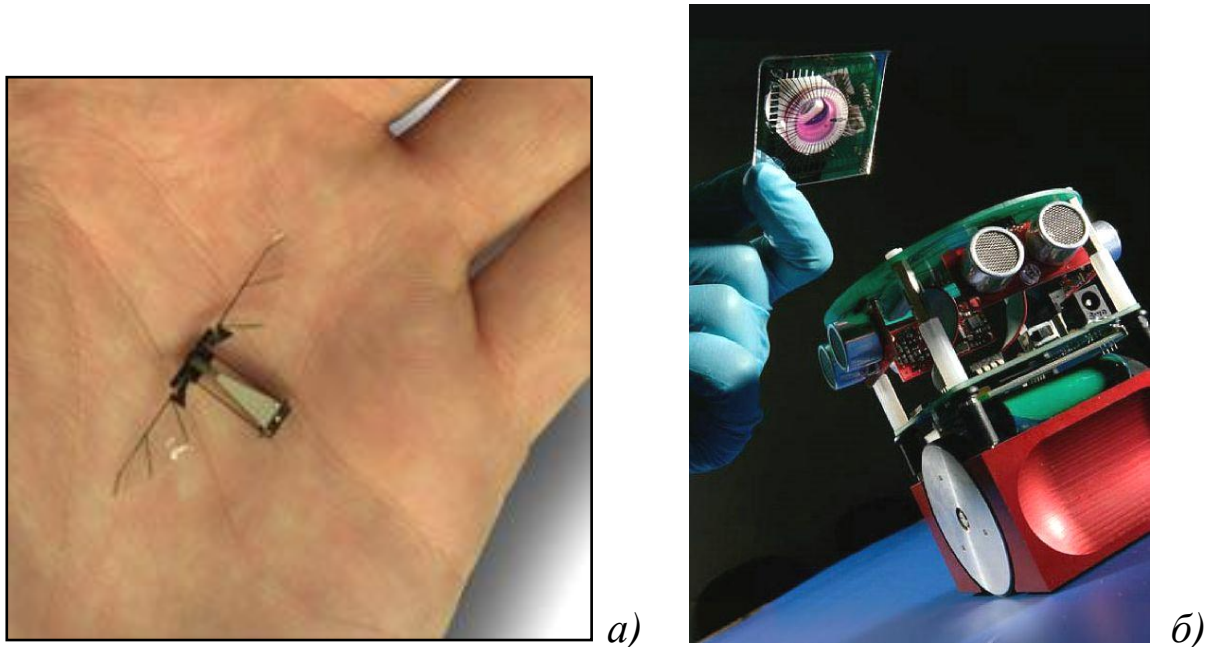


Рис. 1.5 Микроробот-разведчик *а)* и биоробот «Gordon» *б)*.

Современные тенденции развития науки и техники – миниатюризация, нанотехнологии, симбиоз живого и электроники (биокомпьютеры) нашли своё отражение и в робототехнике. Появление миниатюрных микропроцессоров, сверхпрочных и лёгких материалов позволило создать летающий микроробот-муху. Робот был разработан и изготовлен в Гарвардском университете (США) и предназначен для ведения разведки и проведения экологических исследований (рис. 1.5, *а*). В 2008 году в Англии был разработан биоробот (рис. 1.5, *б*) на основе 300 тысяч нейронов, выделенных из мозга крысы и помещённых в питательную среду. Робот способен оценивать окружающую среду, самообучаться, реагировать на внешние воздействия.

1.3 Определение, структура и поколения промышленных роботов

В начале 60-х годов прошлого века на фирме Юнимейт (США) было принято следующее определение: *робот* – серво-

управляемый⁵ манипулятор, предназначенный для замены рабочих, занятых на операциях установки деталей на станки.

С развитием робототехники, расширением области использования роботов, совершенствованием систем управления и методов программирования понятие «робот» постоянно менялось и видоизменялось. Современные определения понятия «робот» введены в стандарты. Однако они не являются окончательными и абсолютными, а только отражают сегодняшнее состояние развития робототехники.

Так в Ассоциации робототехнической промышленности (США) принято следующее определение робота. *Робот представляет собой предназначенный для выполнения некоторого набора операций многофункциональный манипулятор с возможностью смены управляющей программы, способный перемещать материалы, детали, инструменты и специальные устройства посредством задаваемых программно движений.*

Немногоим отличается принятое и закреплённое в стандарте Международной организации по стандартизации (ИСО) определение. *Робот представляет собой предназначенный для выполнения некоторого набора операций автоматический позиционно-управляемый многофункциональный манипулятор с возможностью смены управляющей программы, обладающий несколькими степенями подвижности и способный производить набор программно-управляемых действий с материалами, деталями, инструментами и специальными устройствами.*

Сходство представленных выше двух определений объясняется значительным влиянием американской Ассоциации робототехнической промышленности на Международную организацию ИСО.

Существенно отличается от вышеприведённых определение робота, принятое японской Ассоциацией промышленных роботов. По мнению японских робототехников *робот – механическая система, выполняющая гибкие двигательные функции, аналогичные двигательным функциям живых организмов, или сочетаю-*

⁵ – «серво» в переводе с латинского – «вспомогательный, зависимый». Сервоуправляемый значит автоматически управляемый объект, выполняющий механические перемещения за счёт энергии вспомогательного источника в соответствии с получаемыми сигналами управления малой мощности.

щая такие функции с «разумными» функциями и подчиняющаяся человеческой воле.

В Российской Федерации определение робота закреплено в стандарте (ГОСТ 25686-85). Согласно ГОСТ, *промышленный робот – автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.*

Таким образом, согласно стандарту, промышленный робот, в отличие от других машин, обладает следующими существенными признаками:

- автоматическое управление;
- универсальность (перепрограммируемость).

Следовательно, нельзя считать промышленными роботами *телеоператоры* дистанционного управления, т.е. копирующие манипуляторы и *автооператоры*, т.е. автоматические машины, включающие в себя манипулятор и неперепрограммируемое устройство управления.

Рассмотрим обобщённую структуру промышленного робо-

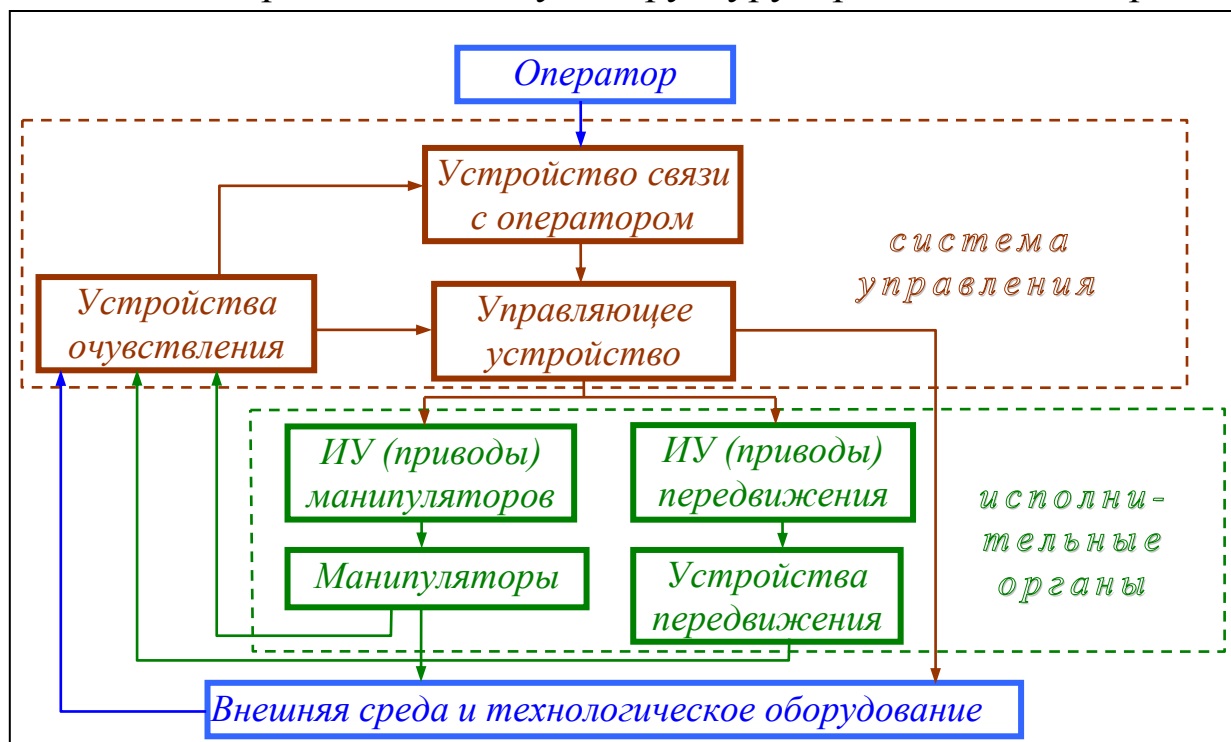


Рис. 1.6 Структурная схема промышленного робота

та. Он состоит из двух структурных единиц: *системы управления* и *исполнительных органов* (рис. 1.6). Исполнительные органы обеспечивают реализацию

двигательных функций робота. В их состав входят приводы, манипуляторы и устройство передвижения. В промышленных роботах используются три типа приводов: пневматические, гидравлические и электрические. *Пневматические* приводы самые дешёвые, однако, имеют плохую чувствительность из-за сжимаемости воздуха и обладают малой грузоподъёмностью. *Гидравлические* приводы, в отличие от пневматических, имеют большую грузоподъёмность. По стоимости это самые дорогие приводы, кроме того, они требуют квалифицированного обслуживания. В работе возможны протечки масла и загрязнение окружающей среды. *Электрические* приводы – самые перспективные, хорошо согласуются с электронными системами управления. Они имеют высокую точность и обладают достаточно большой грузоподъёмностью.

Основной структурной единицей исполнительных органов промышленного робота является манипулятор (рис. 1.7).

Манипулятор – это пространственный рычажный механизм с числом степеней свободы от трёх до десяти, заканчивающийся



Рис. 1.7 Манипулятор промышленного робота KUKA без захвата (Германия)

захватом или технологическим инструментом и предназначенный для выполнения двигательных функций руки человека при перемещении объектов в пространстве. Напомним, что *число степеней свободы* – это число независимых координат, однозначно определяющих положение всех звеньев манипулятора в пространстве. Эти независимые координаты называются *обобщёнными*.

Устройства передвижения служат для перемещения манипуляторов между единицами технологического оборудования с целью расширения рабочей области промышленного робота. На рис. 1.8 представлено устройство передвижения робота по одной продольной оси.

Система управления включает *устройство связи с оператором*. В зависимости от назначения робота и его универсальности это устройство может содержать в своём составе: монитор, клавиатуру, кнопочный пульт управления, джойстики, дисководы для сменных носителей.



Рис. 1.8 Робот *KUKA* на продольной оси *Güdel* (Германия)

Устройства очувствления представляют собой комплекс датчиков, снимающих информацию как о состоянии внешней среды и технологического оборудования, так и о состоянии исполнительных органов промышленного робота. В зависимости от выполняемых роботом функций, это могут быть как обычные микровыключатели, так и видеорекамеры или локационные устройства.

Центральным блоком системы управления является *управляющее устройство* – микроконтроллер или компьютер. Этот функциональный блок обрабатывает сигналы с датчиков системы очувствления, считывает введённую программу, выдаёт команды на отработку движений исполнительными органами. Необходимо отметить, что система управления промышленного робота через управляющее устройство не только управляет работой исполнительных органов робота, но и выдаёт управляющие команды на технологическое оборудование.

Не смотря на сравнительно короткий исторический период существования промышленной робототехники (с начала 60-х годов прошлого века) уже сложилось три поколения промышленных роботов (рис. 1.9). Различия этих поколений не затрагивают исполнительные органы, а определяются возможностями системы управления.

Роботы первого поколения называют *программными*. Они монотонно повторяют заранее заданные определённые движения по одной программе. Точно также работают станки с числовым программным управлением. Единственное, что даёт основание считать их роботами – определённая степень подобия руке человека.

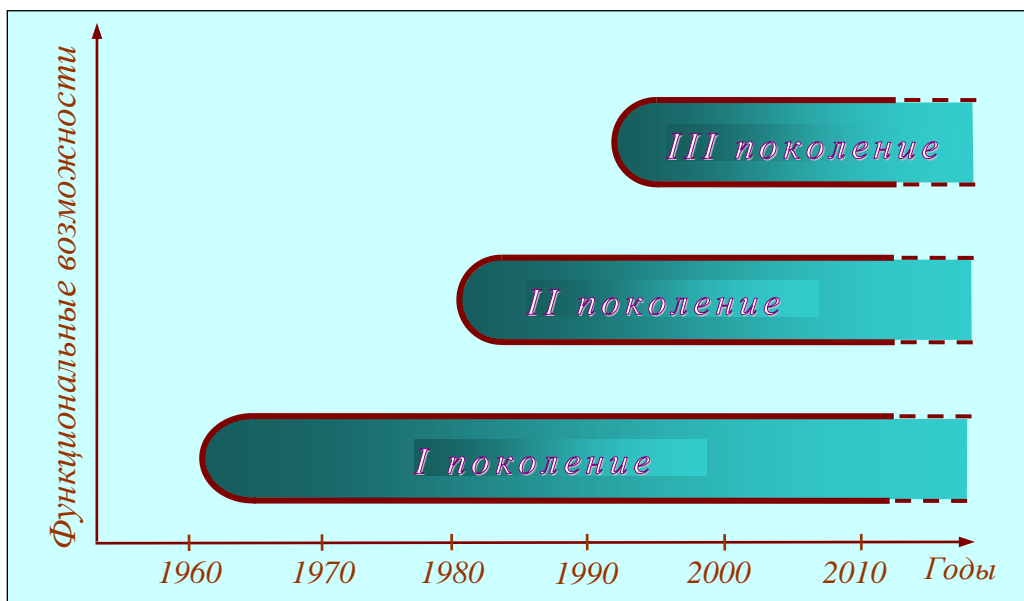


Рис. 1.9 Поколения промышленных роботов

Роботы второго поколения называют *адаптивными*, т.е. приспособляющимися. Они оснащены большим количеством датчиков, информация от которых позволяет им корректировать (до некоторой степени) свои движения. Корректировка означает переход на выполнение действий по другой программе. Область использования адаптивных роботов в последние годы значительно расширилась.

Интеллектными называют роботы третьего поколения. Эти роботы оснащаются искусственными органами чувств и техническим зрением (известно, что 80% информации человек получает от глаз). Такие роботы способны самообучаться. Они программируются на стратегическом уровне, т.е. «не как сделать, а что сде-

лать». Например, программирование сборочного интеллектуального робота заключается в подаче команды «собрать узел». Местонахождение деталей, планирование манипуляционных действий выполняет система управления робота.

Необходимо отметить, что разделение роботов на поколения не означает физическую замену во времени роботов низшего поколения роботами высшего поколения (это видно из диаграммы). Так, например, роботы первого поколения широко используются как в настоящее время, так и будут использоваться в будущем.

1.4 Классификация и основные показатели промышленных роботов

1. По характеру выполняемых работ промышленные роботы разделяют на три группы: производственные (технологические), подъёмно-транспортные (вспомогательные) и универсальные.

Производственные промышленные роботы непосредственно выполняют основные операции технологического процесса, такие как сварка, гибка, окраска, сборка и т.п.

Подъёмно-транспортные промышленные роботы выполняют вспомогательные операции установки заготовок на основное технологическое оборудование и снятия готовых деталей, а также на транспортно-складских операциях.

Универсальные промышленные роботы выполняют как основные, так и вспомогательные технологические операции. Такая универсальность связана со сменой захватного устройства технологическим инструментом.

2. По области применения промышленные роботы делятся по тем операциям, которые они выполняют в: *литейном* производстве, *кузнечнопрессовом*, *сварочном* производствах, *механической обработке* и *термообработке*, *нанесении покрытий* и *автоматическом контроле*, *транспортно-складских* работах и *сборке*, а также в других производствах.

3. По грузоподъёмности промышленные роботы делят на: *сверхлёгкие* (до 1 кг), *лёгкие* (менее 10 кг), *средние* (до 200 кг), *тяжёлые* (до 1000 кг), *сверхтяжёлые* (более 1000 кг).

4. По мобильности различают *стационарные* (рис. 1.2) и *мобильные* (рис. 1.8) промышленные роботы.

5. По типу системы управления различают роботы с *цикловыми*, *позиционными* и *контурными* системами управления. Рассмотрим их принципиальные отличия.

Цикловые системы управления самые распространённые. Они обеспечивают движение звеньев по каждой обобщённой координате от одного упора до другого. Промежуточные точки траектории не фиксируются. Командная информация в программе содержит:

- признак звена;
- направление движения.

Кроме этого, имеются выдержки времени, технологические команды (включение и выключение технологического оборудования), открытие или закрытие схвата. Обычно роботы с *цикловыми* системами управления имеют пневматические приводы и обслуживают один станок.

Позиционные системы управления обеспечивают движение звена по обобщённой координате в виде конечной последовательности точек. Движение между точками не управляется. Командная информация в программе содержит:

- признак звена;
- направление движения;
- величину перемещения.

Для отработки величины перемещения вместо упоров необходимы датчики обратной связи по положению. Роботы с *позиционными* системами управления обслуживают группу станков.

Контурные системы обеспечивают управление движением по непрерывной траектории. Командная информация в программе содержит:

- признак звена;
- направление движения;
- величину перемещения;
- скорость перемещения (или траекторию).

Роботы с *контурным* управлением имеют привод, следящий за положением звена по каждой обобщённой координате. Схват таких роботов может двигаться по сложной пространственной кривой и выполнять технологические операции сварки или окраски.

Покажем отличия описанных систем управления на примере [3]. Допустим, что схвату манипулятора, имеющего две степени свободы (рис. 1.10), необходимо переместиться из точки A в точку B по траектории, по возможности близкой к прямой. На рисунке показаны три варианта.

1. Отрегулировать вручную упоры и переместить схват по траектории ACB на угол Θ и расстояние S . Так выполнит задачу манипулятор с цикловой системой управления.

2. Рассчитать по координатам точки B угол Θ и перемещение S и одновременно обработать эти координаты. Вид траектории между точками A и B не контролируется. Таким способом справится с задачей позиционная система управления.

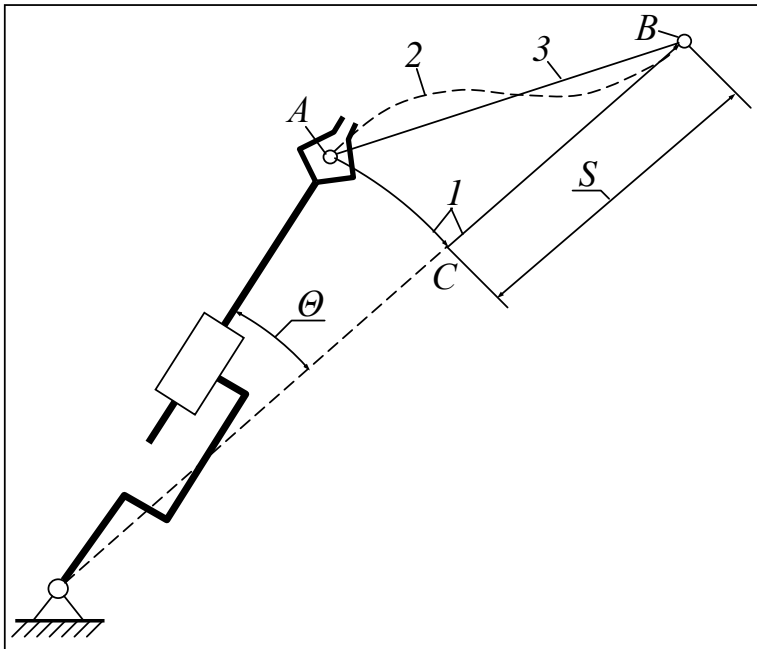


Рис. 1.10 Схема перемещения схвата

3. Разбить траекторию AB на очень малые отрезки. Для концов этих отрезков рассчитать малые перемещения $(\Delta\Theta_1, \Delta S_1)$; $(\Delta\Theta_2, \Delta S_2)$; $(\Delta\Theta_3, \Delta S_3)$;... Затем обработать эти перемещения. Так работает контурная система управления.

Особое место среди производственных промышленных роботов занимают *роботы-станки*, построенные на основе применения механизмов параллельной структуры. Понятие робот-станок было введено в 1992 году при описании станочного оборудования, позволяющего посредством одного и того же механизма выполнять транспортные операции и операции обработки [4]. Данные механизмы позволяют расширить функциональные возможности станочного оборудования и, при наличии системы управления, оснащенной элементами искусственного интеллекта, делает данное оборудование близким к интеллектуальным роботам. На рис. 1.11

мают *роботы-станки*, построенные на основе применения механизмов параллельной структуры. Понятие робот-станок было введено в 1992 году при описании станочного оборудования, позволяющего посредством одного и того же механизма выполнять транспортные операции и операции обработки [4]. Данные механизмы позволяют расширить функциональные возможности станочного оборудования и, при наличии системы управления, оснащенной элементами искусственного интеллекта, делает данное оборудование близким к интеллектуальным роботам. На рис. 1.11

представлен робот-станок, предназначенный для выполнения механической обработки.

Совмещение функций особенно актуально для сложных высокоточных операций, когда требуется изготовление детали от одной базы. В данном случае получаем универсальное оборудование, позволяющее выполнять несколько различных технологи-

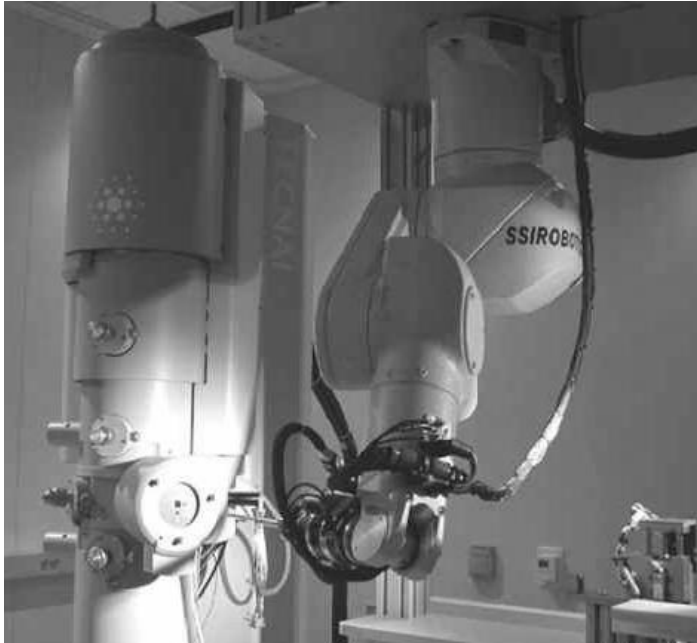


Рис. 1.11 Робот-станок

ческих операций для широкой номенклатуры изделий. Главной отличительной особенностью робота-станка от обрабатывающего центра является универсальность, точнее, более богатые кинематические возможности перемещения механизмов. Безусловно, из набора роботов-станков можно построить распределенный обрабатываю-

щий центр. Механизмы параллельной структуры расширили возможности исполнительных механизмов станков, сделали их более облегченными и универсальными. Наличие параллельных кинематических цепей позволяет управлять одним выходным звеном по нескольким параллельным каналам, обеспечивая одновременное управление по положению, скорости, более высоким производным, а также по силе.

Рассмотренная система классификации роботов лежит в основе регламентации их основных технических параметров, приведенных ниже.

- *грузоподъемность* – наибольшая масса объекта манипулирования. Для универсальных промышленных роботов, выпускающихся без захватного устройства, грузоподъемность включает массу этого устройства.
- *размеры и форма рабочего пространства* – часть пространства, ограниченная поверхностью, огибающей все возможные

положения центра захватного устройства. Определяется числом, размерами звеньев манипулятора и характером их соединения.

- *число степеней свободы* (определение см. выше). Универсальные промышленные роботы имеют, обычно, шесть или семь степеней свободы. Подъёмно-транспортные роботы – три, четыре.
- *величины перемещений по каждой обобщённой координате*. Кроме этого – время перемещения, скорость и ускорение, погрешность отработки конкретной обобщённой координаты.
- *показатели захватного устройства* (если входит в комплект): усилие захвата, время захватывания, максимальные и минимальные габариты захватываемой детали.
- *погрешность позиционирования* – отклонение центра рабочего органа (захвата) от положения, заданного управляющей программой (0,005 ... 2) мм. Определяется назначением робота и точностными требованиями конкретной технологической операции.
- *показатели устройства управления* – вид системы (цикловая, позиционная, контурная); число одновременно управляемых движений, число каналов связи с технологическим оборудованием.
- *давление и расход рабочей жидкости или воздуха* (для роботов с гидро- или пневмоприводом).
- *напряжение питания, потребляемая мощность*.
- *наработка на отказ (в часах), срок службы (лет)*.
- *масса и габариты*.

1.5 Контрольные вопросы

- 1.1 Кто впервые ввёл понятие «робот» и что это слово означает?
- 1.2 Где и когда появились первые *промышленные* роботы?
- 1.3 Какая страна является лидером в робототехнике?
- 1.4 Когда появились первые роботы в СССР?
- 1.5 Что такое робототехника?
- 1.6 В чём заключаются три закона робототехники?
- 1.7 В чём заключаются сформулированные Шимоном Нофом три закона использования промышленных роботов?

- 1.8 Назовите объективные предпосылки начала бурного развития робототехники.
- 1.9 Что такое промышленный робот согласно ГОСТ?
- 1.10 Из каких основных структурных единиц состоит промышленный робот?
- 1.11 Что такое *манипулятор*?
- 1.12 В чём заключаются принципиальные отличия роботов первого, второго и третьего поколений?
- 1.13 Как классифицируются промышленные роботы?
- 1.14 Чем отличаются друг от друга цикловые, позиционные и контурные системы управления промышленными роботами?
- 1.15 Назовите основные технические показатели, характеризующие технические возможности промышленных роботов.

2 Структура манипуляторов

Структура промышленного робота, как было показано выше, включает две составные части – исполнительный орган в виде манипулятора и систему управления. Процесс развития робототехники, появление роботов новых поколений, как показывает история, затрагивает в основном совершенствование систем управления. Механическая же часть роботов при этом остаётся неизменной. Тем не менее, большинство технических показателей промышленных роботов, таких как грузоподъёмность, размеры и форма рабочего пространства, число степеней свободы, погрешность позиционирования и др., определяются параметрами их механической системы. В связи с этим, проектирование механической части роботов было и остаётся важнейшей частью создания новых промышленных роботов. Рассмотрим основные задачи механики роботов, решаемые на основных этапах их жизненного цикла.

2.1 Задачи механики промышленных роботов

Проектирование обычно начинается с обследования операций и условий производства, в которых предполагается работа робота. Изучаются внешние структурные условия:

- тип перемещаемого объекта;
- его число степеней свободы;
- вид траектории перемещения.

По внешним структурным условиям выполняется *структурный синтез* манипулятора, включающий определение числа степеней свободы, количества звеньев и характера их соединения в кинематических парах. Структурный синтез базируется на *структурном анализе*.

Затем изучаются перемещения, скорости и ускорения объекта манипулирования. Эти скорости и ускорения пересчитываются в скорости и ускорения в кинематических парах робота. В этом состоит суть *обратной задачи кинематики*, которая формулируется следующим образом. По известным координатам, скорости и

ускорения захвата определяются обобщённые координаты, скорости и ускорения в каждой кинематической паре манипулятора.

По результатам решения этой задачи формируются требования к приводам по скорости и передаточному отношению. Требуемые ускорения в кинематических парах по заданному ускорению захвата обычно не определяются, а решается задача определения усилий в кинематических парах для реализации заданного движения. Эту задачу называют *обратной задачей динамики*.

После определения усилий, обобщённых скоростей и ускорений определяют абсолютные скорости и ускорения центров масс звеньев и угловые скорости и ускорения звеньев, главные моменты и главные векторы сил инерции звеньев. Последние нужны для прочностных расчётов.

Затем, решая задачу о движении манипулятора под действием заданных сил (*прямая задача динамики*), убеждаются в выполнении технических требований. В противном случае меняют структурную схему манипулятора, и расчёты повторяют заново. Прямая задача динамики включает в свой состав *прямую задачу кинематики*, заключающуюся в определении положения скорости и ускорения захвата по известным обобщённым координатам, скоростям и ускорениям.

При эксплуатации промышленного робота на этапе его программирования решается *обратная задача кинематики*. Решение этой задачи даёт ответ на вопрос, какие обобщённые координаты должен отработать каждый из двигателей манипулятора, чтобы захват вышел в заданную точку пространства.

Таким образом, проектирование и эксплуатация промышленных роботов сопровождается решением всех основных задач механики:

- структурный анализ и синтез;
- прямая и обратная задачи кинематики;
- прямая и обратная задачи динамики.

Рассмотрим более подробно решение этих задач применительно к робототехнике.

2.2 Структурный анализ манипуляторов

Манипулятор промышленного робота, как отмечено выше, это пространственная, как правило, незамкнутая кинематическая цепь, заканчивающаяся захватным устройством. Число входных звеньев равно числу приводов, выходное звено – одно, это захват 3 (рис. 2.1, *а*). Кроме незамкнутых применяются комбинированные схемы, в состав которых входят замкнутые контуры. На рис. 2.1, *б* замкнутый контур образуют звенья $0, 1, 5, 4$.

Основным структурным параметром манипулятора, как и любого другого механизма, является *число степеней свободы* (w). Его определяют по формуле:

$$w = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \quad (2.1)$$

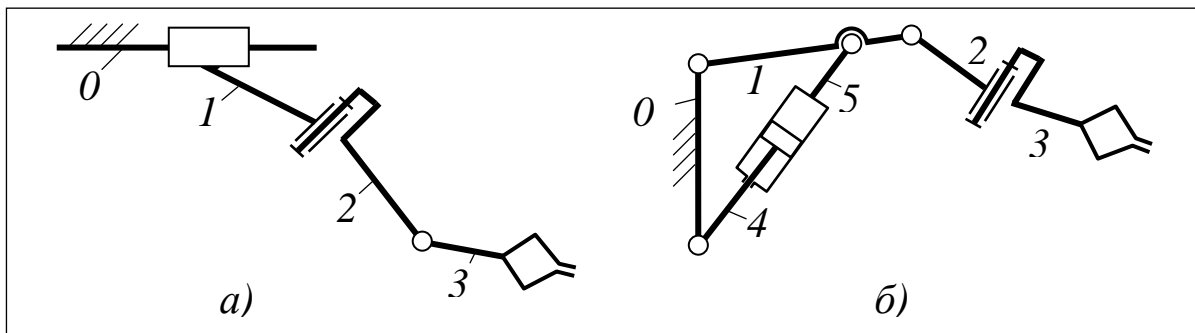


Рис. 2.1 Структурные схемы манипуляторов

где n – число подвижных звеньев; p_5, p_4, p_3 – число кинематических пар пятого, четвёртого и третьего классов⁶ соответственно.

Отметим, что в формуле (2.1) не учитывается число кинематических пар второго и первого классов. Это объясняется тем, что высшие пары в кинематических цепях манипуляторов не используются.

Число степеней свободы манипулятора, как многоцелевой системы, должно выбираться в соответствии с той целью, которая требует максимальной подвижности захвата. В общем случае w должно быть равно шести. Если же требуется воспроизвести пространственную траекторию только одной точки захвата, то w уменьшается до трёх.

⁶ – класс кинематической пары определяется по числу связей в ней. Например, вращательная кинематическая пара имеет пять связей, следовательно, является парой пятого класса.

Три степени свободы, необходимые для перемещения в заданную точку пространства центра захвата называются *переносными*. Для ориентации захвата относительно неподвижной точки пространства существуют *ориентирующие* степени свободы. Они располагаются как можно ближе к захвату. В мобильных роботах устройство передвижения даёт ещё от одной до шести степеней свободы. Таким образом, число степеней свободы робота в зависимости от его целевого назначения и структуры может варьироваться от 3 до 12.

Следует иметь в виду, что формулу (2.1) можно использовать для манипуляторов, имеющих в своём составе только незамкнутые кинематические цепи, как, например, на рис. 2.1, а. Если кинематическая цепь манипулятора включает замкнутые контуры (как на рис. 2.1, б), то расчёт w по этой формуле может дать неверный результат. Замкнутые контуры, в отличие от незамкнутых, могут иметь избыточные связи. А они в формуле (2.1) не учтены.

Структурный анализ манипуляторов заключается, прежде всего, в определении числа степеней свободы. Для незамкнутых кинематических цепей, как указывалось выше, этот структурный параметр определяется по формуле (2.1). В качестве примера определим w манипулятора, изображённого на рис. 2.2.

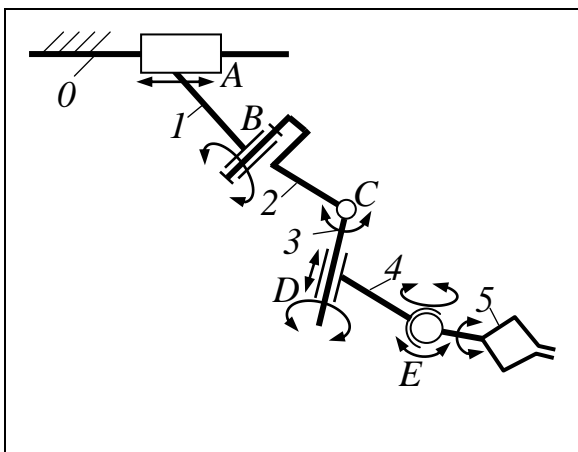


Рис. 2.2 Схема манипулятора

Манипулятор состоит из пяти подвижных звеньев ($n = 5$), соединённых между собой тремя кинематическими парами пятого класса (A, B, C), одной, цилиндрической D, – четвёртого, и одной, сферической E – третьего класса.

$$w = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 8.$$

Таким образом, число степеней свободы манипулятора равно восьми.

Вторым способом определения w является способ простого суммирования подвижностей в кинематических парах:

$$w = w_{01} + w_{12} + w_{23} + \dots + w_{(n-1)n}. \quad (2.2)$$

При этом следует иметь в виду, что данный способ применим только для разомкнутых кинематических цепей (рис. 2.1, а; рис. 2.2).

Определим число степеней свободы манипулятора (рис. 2.2) вторым способом. Предварительно отметим, что кинематические пары A , B и C – одноподвижные, цилиндрическая пара D – двухподвижная, а пара E – трёхподвижная (подвижности на рисунке показаны стрелками). Получим: $w = w_{01} + w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{45} = 1 + 1 + 1 + 2 + 3 = 8$. Вторым способом получен тот же результат.

Другим важным структурным параметром манипулятора является *маневренность* (m) – число степеней свободы при неподвижном захвате. Этот параметр оценивает возможности манипулятора работать с объектами, находящимися за препятствиями. Как правило, маневренность большинства структурных схем манипуляторов равна нулю. Это значит, что его кинематическая цепь при фиксированном положении объекта манипулирования, а, следовательно, и захвата его удерживающего, занимает единственное положение в пространстве. Если же на месте этой цепи окажется препятствие, то объект становится для манипулятора недостижимым. Манипулятор не сможет «обогнуть» препятствие и подойти к объекту с другой стороны.

Манипуляторы, входящие в состав универсальных промышленных роботов с контурной системой управления могут иметь маневренность равную единице, а иногда и двум. Определять маневренность по формуле (2.1), исключив из числа подвижных звеньев захват, необходимо с осторожностью. Расчёт может дать неверный результат; ведь при неподвижном захвате, последний является элементом стойки, и кинематическая цепь становится замкнутой. А в замкнутых цепях, как указывалось выше, возможно наличие избыточных связей, которые формула (2.1) не учитывает. Возможно определение маневренности по формуле (2.1), если предварительно убедиться в отсутствии избыточных связей при неподвижном захвате, например, методом пробы на неточность [5].

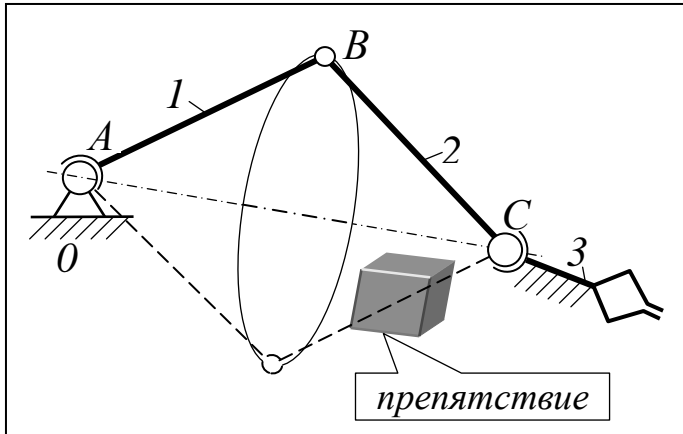


Рис. 2.3 К определению маневренности

ности

проходящей через центры сферических шарниров A и C . Следовательно маневренность манипулятора равна единице ($m = 1$).

Вид кинематических пар, количество и размеры звеньев манипулятора определяют форму и размеры *рабочего пространства*. По определению *рабочее пространство* – это пространство, ограниченное поверхностью, огибающей все возможные положения захвата. На рис. 2.4 показано рабочее пространство манипуляторов с тремя степенями свободы. Если в составе манипулятора все кинематические пары поступательные, то его рабочее пространство имеет форму параллелепипеда (рис. 2.4, а). Если, кроме поступательных, есть одна вращательная кинематическая пара, то форма рабочего пространства – цилиндрический сектор (рис. 2.4, б). Наличие в составе структурной схемы хотя бы двух вращательных кинематических пар обуславливает форму рабочего пространства в виде шарового сектора (рис. 2.4, в). Количественно рабочее пространство оценивается его объёмом в кубических метрах. Чем больше объём рабочего пространства, тем с большим числом единиц технологического оборудования может взаимодействовать промышленный робот. При разработке компоновки робототехнических комплексов

Самым надёжным способом определения маневренности является способ, основанный на анализе подвижностей структурной схемы при неподвижном захвате. Проиллюстрируем этот способ на примере (рис. 2.3). Из рисунка видно, что звенья 1 и 2 могут вращаться вокруг

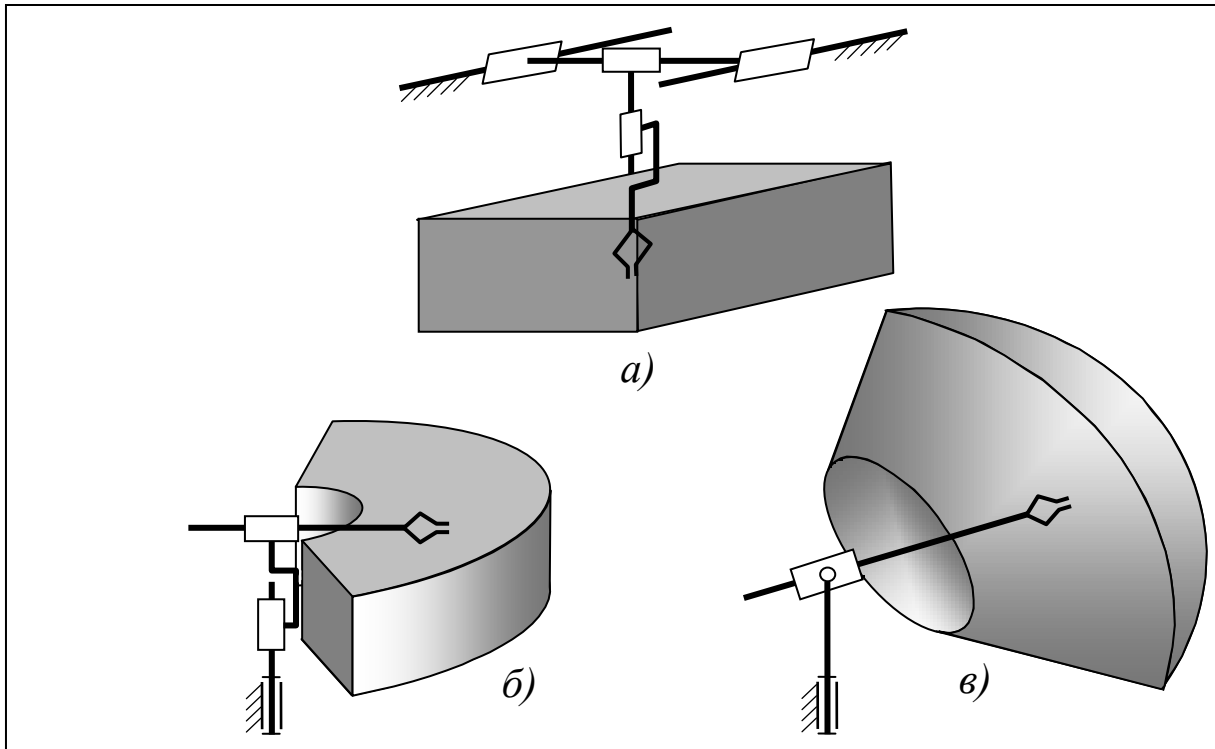


Рис. 2.4 Рабочее пространство манипуляторов

(РТК) необходимо, чтобы рабочие зоны технологического оборудования перекрывались рабочим пространством промышленного робота.

Для оценки возможности выполнения манипулятором операции ориентирования объекта в заданной точке рабочего пространства используются параметры – *угол сервиса* и *коэффициент сервиса*.

Угол сервиса (θ) – телесный угол, который описывает продольная ось захвата при движении вокруг фиксированной точки рабочего пространства. Покажем этот угол на примере манипулятора, изображённого на рис. 2.3. Продольная ось захвата CD (рис.

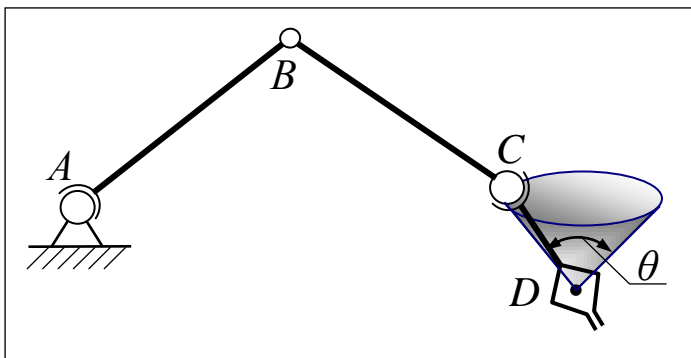


Рис. 2.5 К определению угла сервиса

2.5) может находиться внутри или на границе телесного угла θ . Чем больше этот угол, тем больше возможностей у манипулятора по ориентации объекта в точке D . Угол сервиса измеряется в степенях.

Если продольная ось захвата может подойти к фиксированной

точке внутри рабочего пространства с любой стороны, то угол сервиса равен 4π стерадиан.

Безразмерная форма угла сервиса называется коэффициентом сервиса. Коэффициент сервиса (K_θ) – это отношение угла сервиса к 4π :

$$K_\theta = \theta / (4\pi).$$

Из определения следует, что коэффициент сервиса может принимать значения от нуля до единицы. Коэффициент сервиса используется при проектировании манипуляторов вследствие его зависимости от размеров звеньев. Кроме того, эту характеристику можно использовать также для выделения в рабочем пространстве наиболее удобных областей с достаточно большим коэффициентом сервиса. Поясним это на примере манипулятора, изображённого на рис. 2.5. Его рабочее пространство имеет форму шара с центром в точке A и радиусом $R = l_{AB} + l_{BC} + l_{CD}$. Считая, что ограничений на углы поворота звеньев нет, выделим в рабочем

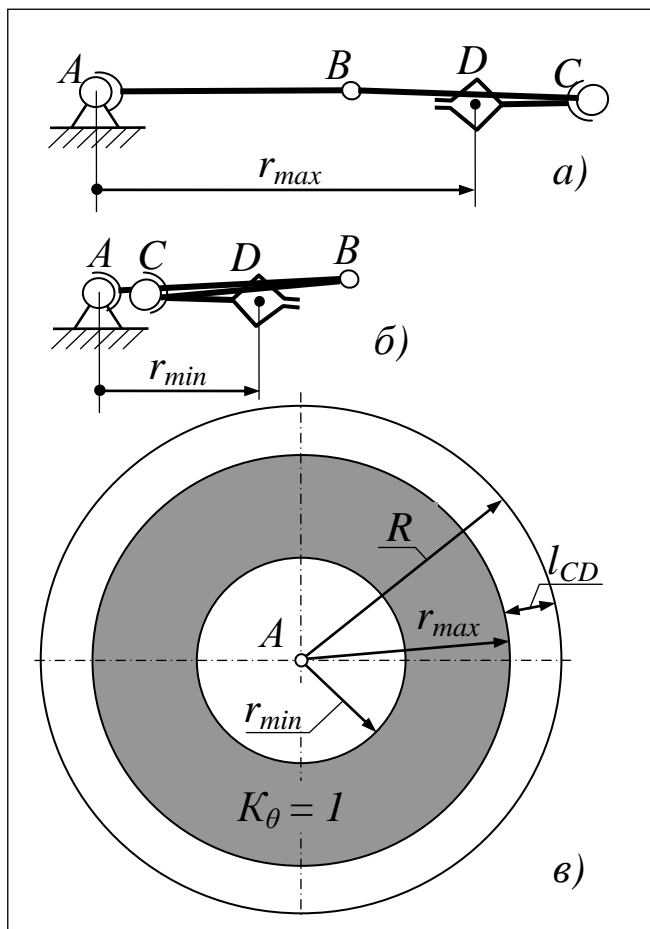


Рис. 2.6 К определению области с $K_\theta = 1$

пространстве область с коэффициентом сервиса $K_\theta = 1$, где звено CD может подойти к точке D с любой стороны. Из рис. 2.6, a видно, что максимальный радиус сферы, внутри которой $K_\theta = 1$, определяется при вытянутых в одну прямую звеньях AB и BC , захват должен подойти к точке D с противоположной от центра A стороны. Отсюда следует:

$$r_{max} = l_{AB} + l_{BC} - l_{CD}. \quad (2.3)$$

Минимальный радиус сферы, за пределами которой $K_\theta = 1$, определяется, когда звенья AB и BC сложатся в одну прямую (рис 2.6, b), а звено CD подойдёт к точке D со стороны

центра A . Отсюда следует

$$r_{min} = l_{AB} - l_{BC} + l_{CD}. \quad (2.4)$$

Анализ равенства (2.3) (см. также рис. 2.6, в) позволяет сделать вывод: чтобы увеличить радиус r_{max} , необходимо *минимизировать длину звена CD* . Из равенства (2.4), следует, что при минимальной длине l_{CD} уменьшить радиус r_{min} можно единственным способом – *выполнять звенья AB и BC одинаковой длины*.

Структурная схема, изображённая на рис. 2.5 идентична структуре руки человека. Именно по указанным выше принципам природа «сконструировала» самый совершенный биологический манипулятор.

2.3 Структурный синтез манипуляторов

Под структурным синтезом понимается проектирование структурной схемы манипулятора по заданным структурным условиям [6]. К структурным условиям относятся:

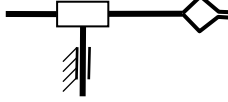
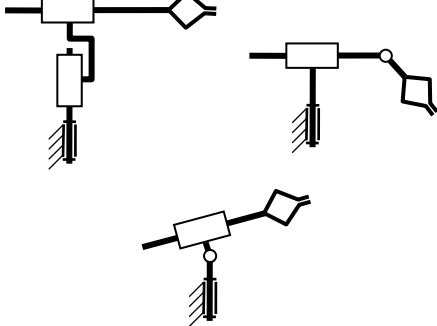
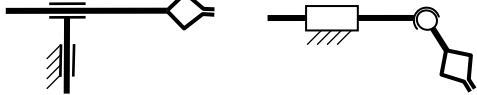
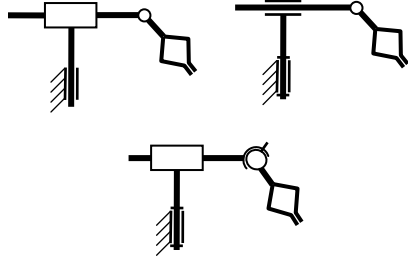
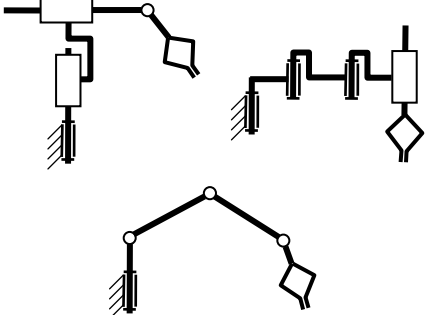

- тип объекта манипулирования (объект точечной формы, стержень, плоскость, тело сложной формы и т.п.);
- число степеней свободы объекта манипулирования;
- траектория его движения.

Следует различать число степеней свободы объекта манипулирования (w_o) и число степеней свободы манипулятора (w). Очевидно, что объект манипулирования не может иметь w_o больше шести, а манипулятор – может, т.е. $w \geq w_o$. В случае, когда добавление некоторой подвижности манипулятору не добавляет новой подвижности перемещаемому объекту, то введённая подвижность называется *пассивной по отношению к объекту*. Как правило, такие подвижности добавляют манипулятору, чтобы увеличить его маневренность. В большинстве случаев считают, что $w = w_o$. Основой структурного синтеза манипуляторов является структурная формула (2.1). Учитывая, что в разомкнутых цепях манипуляторов число кинематических пар равно числу подвижных звеньев, получим:

$$\begin{cases} w_o = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 \\ n = p_5 + p_4 + p_3 \end{cases}. \quad (2.5)$$

Таблица 2.1

Синтез структурных схем манипуляторов

Число степеней свободы объекта w_o	Число подвижных звеньев n	Структурные схемы
3	2	
	3	
4	2	
	3	
	4	
5	2	

Продолжение табл. 2.1

	3	
5	4	
	5	
6

Результаты синтеза по формулам (2.5) сведены в таблицу 2.1. В этой таблице не представлены структурные схемы с объёмом рабочего пространства равным нулю, как не имеющие практического применения. Следует также отметить, что использование кинематических пар четвёртого, и особенно третьего классов (например, шаровой шарнир, шаровой шарнир со штифтом) ограничено из-за технической сложности реализации независимых движений в этих парах. Поэтому в реальных схемах используются, как правило, кинематические пары только пятого класса (поступательные и вращательные).

Разумеется, в таблице представлены далеко не все структурные схемы манипуляторов с числом степеней свободы $w_o \leq 5$. Кроме того, последняя строка таблицы говорит о её незавершённости.

ности. Дополнить и расширить таблицу читателю предлагается самостоятельно.

При проектировании промышленного робота задача структурного синтеза манипулятора является одной из основных, т.к. её решение связано непосредственно с выполнением функций робота. Сравнивая структурный синтез манипуляторов со структурным синтезом обычных механизмов, где число степеней свободы является заданным, следует отметить, что w манипулятора выбирается исходя из условий выполнения технологического процесса, т.е. определяется внешними структурными условиями.

Для синтеза разомкнутых цепей (см. табл. 2.1) характерен *принцип наложения механизмов*, который предполагает построение на одном из подвижных звеньев нового механизма, так что при этом число степеней свободы всей системы возрастает.

Кроме этого, на этапе структурного синтеза приходится решать ещё и дополнительно синтез кинематических цепей приводов, образующих со звеньями разомкнутой цепи локальные замкнутые контуры (рис. 2.1, б), где используется известный принцип Ассура. При этом актуальной является задача ликвидации избыточных связей. От того, к каким звеньям присоединяются группы Ассура, содержащие привод, зависят все основные характеристики манипулятора: усилия в кинематических парах, расход энергии, быстродействие, точность позиционирования. В связи с этим задачу структурно синтеза нельзя ограничивать геометрическим уровнем.

2.4 Манипуляторы параллельной структуры

Как показано ранее, большинство манипуляторов более или менее напоминают человеческую руку и содержат последовательно расположенные двигатели, каждый из которых встроен в кинематическую пару или связан с ней, имеющей одну подвижность. Рука с последовательно расположенными двигателями накапливает ошибки от «плечевого» шарнира к захватному устройству. Кроме того, подобные конструкции часто не обладают достаточной жесткостью и нуждаются в компенсирующем воздействии и весьма усложнённом управлении, чтобы уменьшить или

устранить ошибки, обусловленные внешней нагрузкой. Они также склонны к низкочастотным колебаниям [...].

В последние годы в машиностроительном производстве и робототехнике проявляется повышенный интерес к механическим системам параллельной структуры. Механизм параллельной структуры, как правило, содержит выходное звено (для манипулятора это – захват), соединённое со стойкой при помощи нескольких кинематических цепей сходного строения. Наибольшее распространение получили пространственные механизмы с тремя и более степенями подвижности. Такой тип архитектуры привлёк внимание учёных почти три десятка лет назад с тех пор, как решение задач повышения точности, жёсткости и динамических показателей стали критическими для механизмов последовательной архитектуры [7].

Типичным представителем манипуляторов параллельной структуры является гексапод (рис. 2.7), построенный по принципу платформы Стюарта. Он содержит шесть одинаковых механических телескопических устройств поступательного движения, представляющих собой шариковые винтовые передачи (ШВП). Для изменения их длины служат регулируемые электроприводы с датчиками положения. Кроме этого, в качестве приводов могут использоваться гидравлические сервомеханизмы на основе линейных гидроцилиндров.

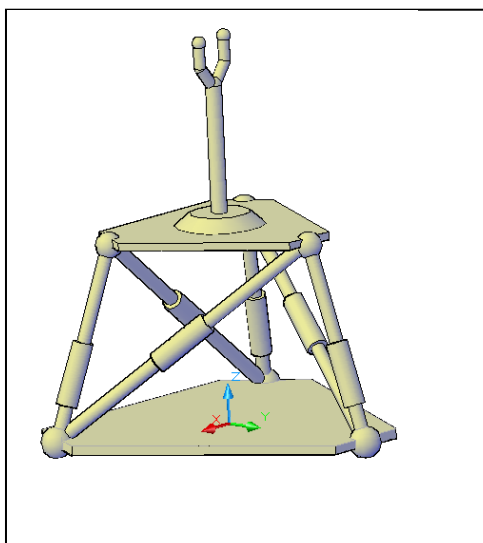


Рис. 2.7 Гексапод

Как видно из рис. 2.7, приводы со стойкой образуют замкнутые контуры, где могут иметь место избыточные связи. Следовательно, для манипуляторов параллельной структуры на этапе структурного синтеза является актуальной задача их ликвидации. Для выполнения многих операций манипулятору достаточно иметь три степени свободы (трипод). Покажем решение этой задачи на примере трипода⁷. Результат синтеза должен удовлетворять двум основ-

⁷ В решении этой задачи принимал участие доцент Ермак В.Н.

ным условиям. Во-первых, при запертых гидроцилиндрах число степеней свободы манипулятора должно быть равно нулю. Во-вторых, в замкнутых контурах, образуемых гидроцилиндрами со стойкой и подвижной платформой не должно быть избыточных связей.

Известно, что структурные параметры синтеза связаны формулой:

$$w + s - q = 6n,$$

где w – число степеней свободы механизма, s – суммарное число связей в кинематических парах, q – число избыточных связей, n – число подвижных звеньев.

По условиям синтеза $w = 0$, $q = 0$. В исходном механизме $n = 7$. Тогда необходимое число связей $s = 6n - w + q = 6 \cdot 7 - 0 + 0 = 42$. Найденные связи необходимо разложить по девяти кинематическим парам. В каждой из них может содержаться не более пяти связей. При этом возможны следующие, отличающиеся по составу, варианты раскладки связей:

- 1) $5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 2$;
- 2) $5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 4 + 3$;
- 3) $5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 4 + 4 + 4$.

Запертый гидроцилиндр представляет собой кинематическую пару пятого класса (допускающую только вращение поршня относительно цилиндра). Таким образом, остаётся определить числа связей в парах стойки и подвижной платформы. Каждое из этих звеньев образует с элементами гидроцилиндров по три пары. Исходя из унификации пар, целесообразно остановиться на третьем варианте раскладки связей. Пусть четырёхсвязными будут пары подвижной платформы. Тогда пары стойки – пятисвязные. На этом возможности алгебраического решения задачи исчерпаны. Остаётся подбирать пары по виду взаимного движения или, иначе, по кинематическим возможностям. Эту задачу решают перебором вариантов. Пусть все пары в основании – вращательные, а в подвижной платформе – шаровые со штифтом. Расставляя оси вращательных пар горизонтально, получаем результат (рис. 2.8, а).

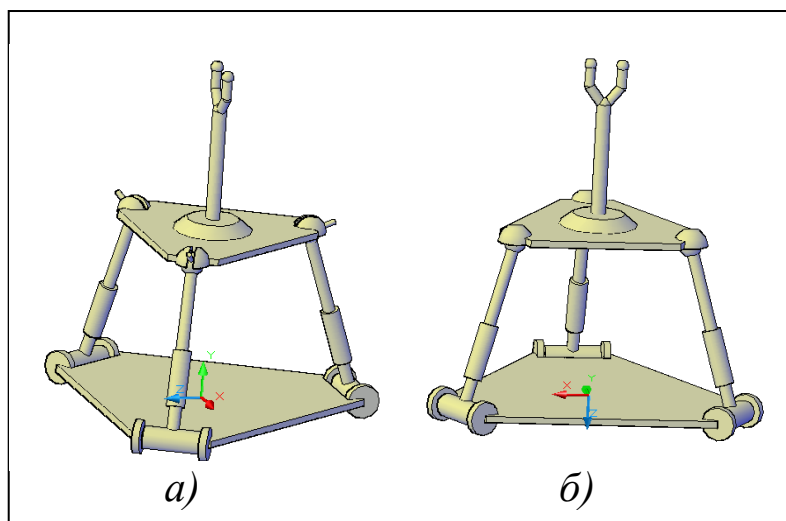


Рис. 2.8 Триподы без избыточных связей

В данной структурной схеме возможно использование вместо гидроцилиндров ШВП, для которых должно быть исключено относительное вращение присоединяемых концов. В случае использования сервомеханизмов с линейными гидроцилиндрами, можно допустить относительное вращение поршня в цилиндре, заменив шаровые шарниры со штифтами на обычные (рис. 2.8, б). Появившиеся при этом дополнительные три степени свободы являются пассивными (местными) и не повлияют на положение подвижной платформы в пространстве.

Таким образом, синтезированные две схемы манипуляторов параллельной структуры можно рекомендовать к использованию с приводами на основе ШВП (рис. 2.8, а) и с сервомеханизмами на основе линейных гидроцилиндров (рис. 2.8, б).

2.5 Контрольные вопросы

2.1 По каким внешним структурным условиям выполняется структурный синтез манипуляторов?

2.2 Назовите основные задачи механики промышленных роботов.

2.3 Запишите структурную формулу, по которой можно определить число степеней свободы манипулятора.

2.4 Как определить число степеней свободы манипулятора, не используя структурную формулу?

2.5 Что такое маневренность манипулятора?

2.6 Что такое рабочее пространство манипулятора?

- 2.7 Что такое угол и коэффициент сервиса манипулятора?
- 2.8 В чём заключается структурный синтез манипуляторов?
- 2.9 Назовите преимущества манипуляторов параллельной структуры по сравнению с манипуляторами последовательной структуры.

3 Кинематика манипуляторов

Как указывалось выше, решение задач кинематики манипуляторов имеет важное практическое значение на всех стадиях жизненного цикла промышленных роботов. Особую роль при этом играет обратная задача кинематики. Ведь для того чтобы запрограммировать перемещение схвата в заданную точку пространства, необходимо определить значения всех обобщённых координат, а затем дать команду двигателям на их отработку. Таким образом, управляющая программа обязательно включает в себя решение обратной задачи кинематики. Но в любом случае, при решении как прямой, так и обратной задач кинематики, необходимо выявить уравнения связи между обобщёнными координатами, скоростями и ускорениями с одной стороны, и координатами, скоростями и ускорениями схвата (или объекта в нём находящегося), с другой стороны. Наиболее простой и самый распространённый метод получения этих уравнений – это *метод преобразования координат*.

3.1 Метод преобразования координат

Рассмотрим манипулятор обобщённой структуры (рис. 3.1). Он имеет n подвижных звеньев, соединённых между собой по-

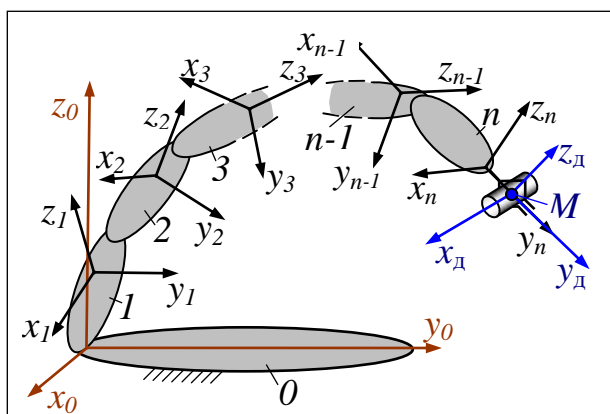


Рис. 3.1 Манипулятор обобщённой структуры

следовательно произвольными кинематическими парами. Центр схвата – точка M . В схвате зажат объект.

Свяжем с каждым звеном манипулятора прямоугольную правую⁸ систему координат (x_i, y_i, z_i) . С объектом свяжем систему (x_d, y_d, z_d) . Положение объекта (или системы

⁸ Правая система координат отличается от левой кратчайшим поворотом оси x к оси y против часовой стрелки, если смотреть со стороны оси z . Здесь и далее будем пользоваться только *правыми* системами координат.

$(x_d y_d z_d)$) в системе координат схвата $(x_n y_n z_n)$ характеризуется шестью известными координатами – тремя линейными и тремя угловыми. Линейные координаты – x_{M_n} , y_{M_n} , z_{M_n} . Угловые координаты характеризуют ориентацию осей системы $(x_d y_d z_d)$ относительно $(x_n y_n z_n)$. Угловые координаты уточним позже.

Для того чтобы получить координаты точки M в абсолютной системе координат $(x_0 y_0 z_0)$, необходимо последовательно выполнить следующие преобразования: из системы координат схвата $(x_n y_n z_n)$ – в систему координат $(x_{n-1} y_{n-1} z_{n-1})$ и далее по цепочке $(x_{n-1} y_{n-1} z_{n-1}) \rightarrow \dots \rightarrow (x_3 y_3 z_3) \rightarrow (x_2 y_2 z_2) \rightarrow (x_1 y_1 z_1) \rightarrow (x_0 y_0 z_0)$. Каждое преобразование выполняется по известным из теоретической механики уравнениям:

$$\begin{cases} x_{M_i} = a_{11}x_{M_j} + a_{12}y_{M_j} + a_{13}z_{M_j} + a \\ y_{M_i} = a_{21}x_{M_j} + a_{22}y_{M_j} + a_{23}z_{M_j} + b, \\ z_{M_i} = a_{31}x_{M_j} + a_{32}y_{M_j} + a_{33}z_{M_j} + c \end{cases} \quad (3.1)$$

где x_{M_i} , y_{M_i} , z_{M_i} – координаты точки M в i -ой системе координат, куда выполняется преобразование (рис. 3.2); x_{M_j} , y_{M_j} , z_{M_j} – координаты точки M в j -ой системе координат, из которой вы-

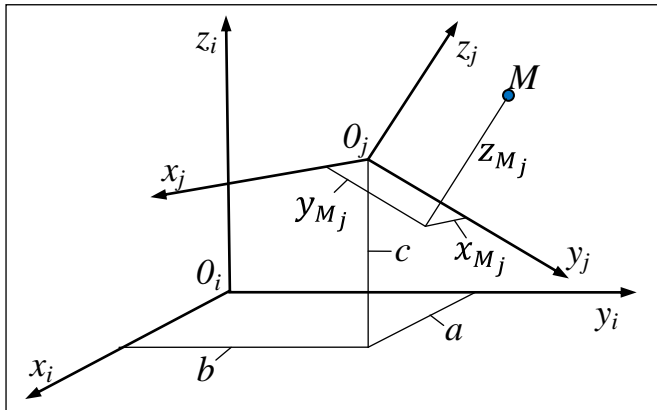


Рис. 3.2 К уравнениям преобразования координат

полняется преобразование; a , b , c – координаты точки O_j в i -ой системе координат; a_{11}, \dots, a_{33} – направляющие косинусы углов между осями: $a_{11} = \cos(\widehat{x_j; x_i})$, $a_{12} = \cos(\widehat{y_j; x_i})$, $a_{13} = \cos(\widehat{z_j; x_i})$, $a_{21} = \cos(\widehat{x_j; y_i})$, $a_{22} =$

$\cos(\widehat{y_j; y_i})$, $a_{23} = \cos(\widehat{z_j; y_i})$, $a_{31} = \cos(\widehat{x_j; z_i})$, $a_{32} = \cos(\widehat{y_j; z_i})$, $a_{33} = \cos(\widehat{z_j; z_i})$.

Ввиду громоздкости записей уравнений преобразования, их принято представлять в матричной форме, добавив к уравнениям (3.1) фиктивное тождество: $1 = 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 1$. Добавление тождества делает матрицы перемножаемыми. Учитывая это, запишем матрицы компонент уравнений (3.1):

$$R_{M_i} = \begin{bmatrix} x_{M_i} \\ y_{M_i} \\ z_{M_i} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad R_{M_j} = \begin{bmatrix} x_{M_j} \\ y_{M_j} \\ z_{M_j} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad T_{ji} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Матрицу T_{ji} называют *матрицей кинематической пары*. Запишем уравнения (3.1) в матричной форме:

$$R_{M_i} = T_{ji} \cdot R_{M_j}. \quad (3.3)$$

Тогда для манипулятора обобщённой структуры (рис. 3.1) уравнение преобразования в матричной форме будет иметь вид:

$$R_{M_0} = T_{10} \cdot T_{21} \cdot T_{32} \cdot \dots \cdot T_{n(n-1)} \cdot R_{M_n}. \quad (3.4)$$

Необходимо напомнить, что при умножении матриц менять их местами нельзя. Отметим также, что уравнение (3.4) равносильно системе трёх алгебраических уравнений, связывающих обобщённые координаты (они находятся в матрицах кинематических пар) с координатами центра схвата (матрица R_{M_0}). В связи с этим, решить прямую задачу кинематики – определить положение центра схвата при заданных обобщённых координатах – можно всегда. Решить обратную задачу возможно только для манипулятора с тремя степенями свободы. Если число степеней свободы больше трёх, то число неизвестных обобщённых координат будет больше числа уравнений, и, следовательно, решение обратной задачи кинематики становится многовариантным.

Для задания положения объекта, находящегося в схвате, линейных координат одной точки M недостаточно. Необходимы ещё три угловые координаты, характеризующие ориентацию осей системы координат объекта $(x_d y_d z_d)$ относительно системы координат схвата $(x_n y_n z_n)$. В этом случае достаточно столбцовую матрицу R_{M_n} заменить наддиагональной матрицей P_{M_n} :

$$P_{M_n} = \begin{bmatrix} \dots & \cos(\widehat{y_d; x_n}) & \cos(\widehat{z_d; x_n}) & x_{M_n} \\ \dots & \dots & \cos(\widehat{z_d; y_n}) & y_{M_n} \\ \dots & \dots & \dots & z_{M_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Тогда левая часть матричного уравнения (3.4) будет также наддиагональной матрицей P_{M_0} , элементы которой будут шесть алгебраических уравнений связи обобщённых координат манипулятора с координатами объекта:

$$P_{M_0} = \begin{bmatrix} \dots & \cos(\widehat{y_D; x_0}) & \cos(\widehat{z_D; x_0}) & x_{M_0} \\ \dots & \dots & \cos(\widehat{z_D; y_0}) & y_{M_0} \\ \dots & \dots & \dots & z_{M_0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Таким образом, применение метода преобразования координат в матричной форме позволяет сравнительно легко получить уравнения связи обобщённых координат с координатами объекта в схвате. Процесс получения этих уравнений сводится к стандартной операции перемножения матриц.

После двойного дифференцирования этих уравнений по времени получают уравнения, связывающие обобщённые скорости и ускорения со скоростью и ускорением схвата или объекта в нём находящимся. Относительно обобщённых скоростей и ускорений уравнения являются *линейными*.

3.2 Пример решения задач кинематики манипулятора

Проиллюстрируем представленный метод на примере манипулятора с тремя степенями свободы (рис. 3.3, а).

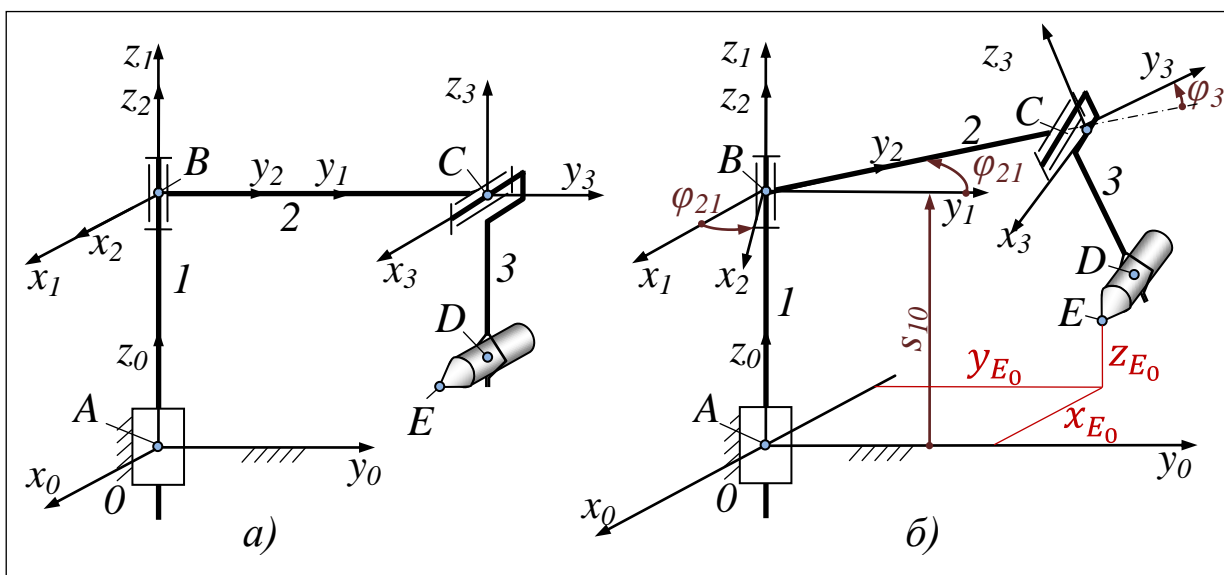


Рис. 3.3 Манипулятор с тремя степенями свободы

Известны размеры звеньев – l_{BC} , l_{CD} ; вылет детали – l_{DE} . На рис. 3.3, а кинематическая схема показана в положении, когда $\varphi_{21} = 0$, $\varphi_{32} = 0$. Свяжем с каждым звеном систему координат $x_i y_i z_i$. Начало каждой из них поместим в конструктивно выраженную точку на звене, обозначенную буквой латинского алфавита. По-

сле отработки обобщённых координат $(s_{10}, \varphi_{21}, \varphi_{32})^9$ манипулятор займёт в пространстве положение, показанное на рис. 3.3, б. С учётом (3.4) запишем абсолютные координаты точки E детали, находящейся в схвате, в матричной форме:

$$R_{E_0} = T_{10} \cdot T_{21} \cdot T_{32} \cdot R_{E_3}, \quad (3.7)$$

где $R_{E_0} = \begin{bmatrix} x_{E_0} \\ y_{E_0} \\ z_{E_0} \\ 1 \end{bmatrix}$ (см рис 3.3, б), $R_{E_3} = \begin{bmatrix} l_{DE} \\ 0 \\ -l_{CD} \\ 1 \end{bmatrix}$. Элементы столбцовой матрицы R_{E_3} – координаты точки E в системе координат третьего звена.

Матрицы кинематических пар T_{10}, T_{21}, T_{32} имеют вид:

$$T_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{21} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{21} & -\sin \varphi_{21} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{21} & \cos \varphi_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{32} & -\sin \varphi_{32} & l_{BC} \\ 0 & \sin \varphi_{32} & \cos \varphi_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Элементы этих матриц получены на основе анализа относительного положения систем координат звеньев (рис. 3.4), а также с учётом формул приведения: $\cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$; $\cos(90^\circ + \varphi) = -\sin \varphi$.

⁹ Здесь и далее показаны *положительные* угловые обобщённые координаты. Угловая обобщённая координата считается положительной, если поворот двух осей системы координат, связанной со звеном, происходит *против часовой стрелки*, если смотреть со стороны третьей оси, совпадающей с осью вращения.

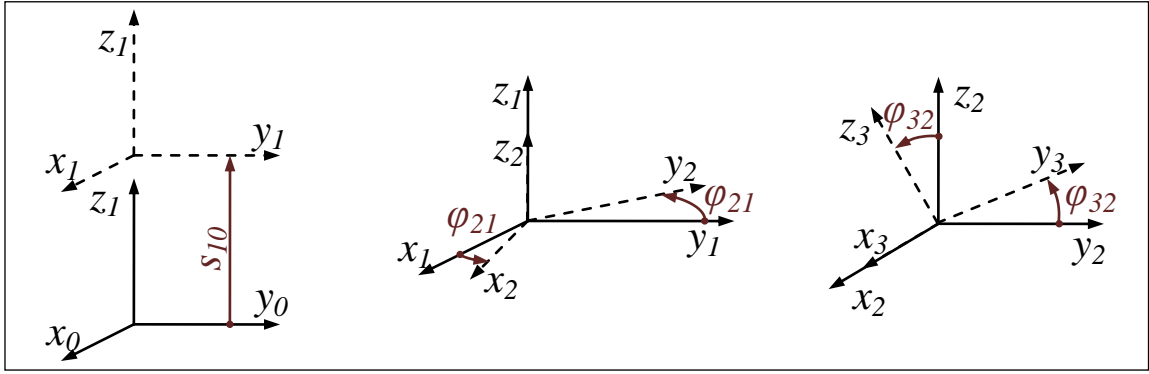


Рис. 3.4 Схемы относительного положения систем координат

Выполнив умножение матриц по формуле (3.7), получим:

$$R_{E_0} = \begin{bmatrix} x_{E_0} \\ y_{E_0} \\ z_{E_0} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{DE} \cos \varphi_{21} - l_{CD} \sin \varphi_{21} \sin \varphi_{32} - l_{BC} \sin \varphi_{21} \\ l_{DE} \sin \varphi_{21} + l_{CD} \cos \varphi_{21} \sin \varphi_{32} + l_{BC} \cos \varphi_{21} \\ s_{10} - l_{CD} \cos \varphi_{32} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Прямая задача кинематики манипулятора сводится к вычислению по уравнениям (3.8) координат x_{E_0} , y_{E_0} , z_{E_0} , если известны обобщённые координаты s_{10} , φ_{21} , φ_{32} . Так решается прямая задача о положениях.

Решим прямую задачу о скоростях и ускорениях. Для этого продифференцируем уравнения (3.8) по времени. После подстановки известных обобщённых скоростей \dot{s}_{10} , $\dot{\varphi}_{21}$, $\dot{\varphi}_{32}$ получим проекции скорости точки E на оси абсолютной системы координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_{E_0} = -l_{DE} \dot{\varphi}_{21} \sin \varphi_{21} - l_{CD} \dot{\varphi}_{21} \cos \varphi_{21} \sin \varphi_{32} - \\ \quad - l_{CD} \dot{\varphi}_{32} \sin \varphi_{21} \cos \varphi_{32} - l_{BC} \dot{\varphi}_{21} \cos \varphi_{21}; \\ \dot{y}_{E_0} = l_{DE} \dot{\varphi}_{21} \cos \varphi_{21} - l_{CD} \dot{\varphi}_{21} \sin \varphi_{21} \sin \varphi_{32} + \\ \quad + l_{CD} \dot{\varphi}_{32} \cos \varphi_{21} \cos \varphi_{32} - l_{BC} \dot{\varphi}_{21} \sin \varphi_{21}; \\ \dot{z}_{E_0} = \dot{s}_{10} + l_{CD} \dot{\varphi}_{32} \sin \varphi_{32}. \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Модуль скорости вычислим по формуле:

$$v_{E_0} = \sqrt{(\dot{x}_{E_0}^2 + \dot{y}_{E_0}^2 + \dot{z}_{E_0}^2)}. \quad (3.10)$$

Положение вектора скорости \bar{v}_{E_0} в пространстве определится направляющими косинусами:

$$\cos(\widehat{v_{E_0}; x_0}) = \frac{\dot{x}_{E_0}}{v_{E_0}}; \quad \cos(\widehat{v_{E_0}; y_0}) = \frac{\dot{y}_{E_0}}{v_{E_0}}; \quad \cos(\widehat{v_{E_0}; z_0}) = \frac{\dot{z}_{E_0}}{v_{E_0}}. \quad (3.11)$$

Вычисление ускорения точки E выполняется аналогично вычислению скорости. Из-за громоздкости результата дифференцирования уравнений (3.9) по времени, ограничимся определением проекции ускорения точки E только на ось z_0 :

$$\ddot{z}_{E_0} = \ddot{s}_{10} + l_{CD} \ddot{\varphi}_{32} \sin \varphi_{32} + l_{CD} \dot{\varphi}_{32}^2 \cos \varphi_{32}.$$

Модуль вектора ускорения точки E и его положение в пространстве определяется по формулам, аналогичным (3.10) и (3.11).

Обратная задача кинематики манипулятора заключается в определении обобщённых координат, скоростей и ускорений, если известны $x_{E_0}, y_{E_0}, z_{E_0}$, а также $\dot{x}_{E_0}, \dot{y}_{E_0}, \dot{z}_{E_0}$ и $\ddot{x}_{E_0}, \ddot{y}_{E_0}, \ddot{z}_{E_0}$.

Полученная в результате использования метода преобразования координат система уравнений (3.8) является *нелинейной* относительно обобщённых координат. Это значительно усложняет решение обратной задачи о положениях. Получить решение этой системы в явном виде удаётся не всегда. В большинстве случаев её решают численным методом. В нашем примере из-за простоты структурной схемы манипулятора возможно получение решения в явном виде. Для этого первые два уравнения системы (3.8) представим в виде:

$$\begin{cases} (x_{E_0} - l_{DE} \cos \varphi_{21} + l_{BC} \sin \varphi_{21}) / (l_{CD} \sin \varphi_{21}) = -\sin \varphi_{32}; \\ (y_{E_0} - l_{DE} \sin \varphi_{21} - l_{BC} \cos \varphi_{21}) / (l_{CD} \cos \varphi_{21}) = \sin \varphi_{32}. \end{cases} \quad (3.12)$$

Сложив почленно полученные уравнения и упростив результат, получим тригонометрическое уравнение относительно обобщённой координаты φ_{21} :

$$x_{E_0} \cos \varphi_{21} + y_{E_0} \sin \varphi_{21} = -l_{DE}. \quad (3.13)$$

Откуда после приведения к одной тригонометрической функции и решения полученного квадратного уравнения:

$$\sin \varphi_{21} = \frac{-2l_{DE}y_{E_0}/x_{E_0} \pm \sqrt{(4l_{DE}^2y_{E_0}^2/x_{E_0}^4 - 4(y_{E_0}^2/x_{E_0}^2 + 1)(l_{DE}^2/x_{E_0}^2 - 1))}}{2(y_{E_0}^2/x_{E_0}^2 + 1)}. \quad (3.14)$$

Вторую угловую обобщённую координату φ_{32} можно получить из второго уравнения системы (3.12). А из третьего уравнения системы (3.8) находим линейную обобщённую координату:

$$s_{10} = z_{E_0} + l_{CD} \cos \varphi_{32}.$$

Таким образом, обратная задача о положениях решена. Однако надо иметь в виду, что приведённое в примере решение имеет место только, если угловые обобщённые координаты изменяются в пределах от 0° до 90° . В противном случае угол необходимо определять по двум тригонометрическим функциям: синусу и косинусу.

Определим теперь обобщённые скорости и ускорения. Для этого в системе линейных уравнений (3.9) первые два уравнения приведём к стандартному виду:

$$\begin{cases} a_1 x + b_1 y = c_1 \\ a_2 x + b_2 y = c_2 \end{cases}, \text{ где неизвестными являются: } x = \dot{\varphi}_{21}, y = \dot{\varphi}_{32}.$$

Используя метод Крамера, получим решение этой системы: $x = (c_1 b_2 - c_2 b_1)/(a_1 b_2 - a_2 b_1)$, $y = (a_1 c_2 - a_2 c_1)/(a_1 b_2 - a_2 b_1)$ или окончательно:

$$\dot{\varphi}_{21} = \frac{-\dot{x}_{E_0} l_{CD} \cos \varphi_{21} \cos \varphi_{32} - \dot{y}_{E_0} l_{CD} \sin \varphi_{21} \cos \varphi_{32}}{l_{CD}^2 \sin \varphi_{32} \cos \varphi_{32} + l_{BC} l_{CD} \cos \varphi_{32}},$$

$$\dot{\varphi}_{32} = \frac{\dot{y}_{E_0} (l_{DE} \sin \varphi_{21} + l_{CD} \cos \varphi_{21} \sin \varphi_{32} + l_{BC} \cos \varphi_{21}) + \dot{x}_{E_0} (l_{DE} \cos \varphi_{21} - l_{CD} \sin \varphi_{21} \sin \varphi_{32} - l_{BC} \sin \varphi_{21})}{l_{CD}^2 \sin \varphi_{32} \cos \varphi_{32} + l_{BC} l_{CD} \cos \varphi_{32}}.$$

Из третьего уравнения системы (3.9) определим обобщённую скорость \dot{s}_{10} :

$$\dot{s}_{10} = \dot{z}_{E_0} - l_{CD} \dot{\varphi}_{32} \sin \varphi_{32}.$$

Таким образом, все обобщённые скорости найдены.

Определение обобщённых ускорений начинается с дифференцирования системы (3.9) по времени. После дифференцирования имеем систему трёх линейных уравнений относительно обобщённых ускорений \ddot{s}_{10} , $\ddot{\varphi}_{21}$, $\ddot{\varphi}_{32}$. Эти ускорения определяются также как и обобщённые скорости.

3.3 Автоматизированный метод кинематического анализа роботов

Сложность, а зачастую и невозможность решения обратной задачи о положениях в явном виде привело к необходимости использования численных методов. В конце шестидесятых годов прошлого века в США П. Шет и Д. Уикер, мл. разработали численный метод решения задач кинематики пространственных рычажных систем [8].

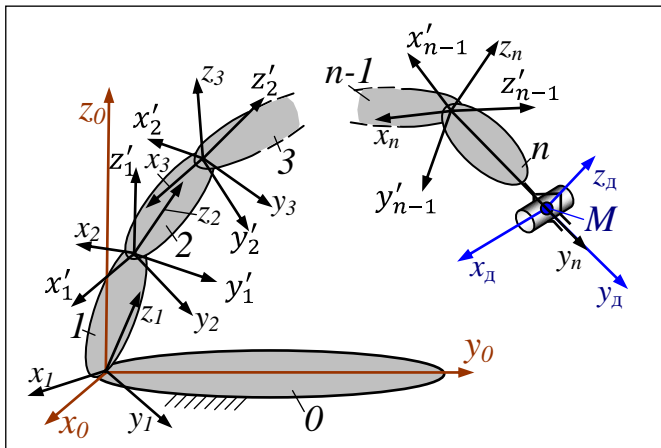


Рис. 3.5 Системы координат манипулятора

Рассмотрим суть этого метода на примере манипулятора обобщённой структуры (рис. 3.5). С каждым звеном связывается столько систем координат, в образовании скольких кинематических пар оно участвует. С объектом, находящимся в схвате связывается система координат

(x_d, y_d, z_d) . Тогда матричное уравнение преобразования координат:

$$P_{M_0} = T_{10} \cdot T_1 \cdot T_{21} \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_{n(n-1)} \cdot P_{M_n}, \quad (3.15)$$

кроме матриц кинематических пар $T_{10}, T_{21}, T_{32}, \dots, T_{n(n-1)}$ будет включать матрицы звеньев – T_1, T_2, T_3, \dots . Напомним, что P_{M_0} и P_{M_n} – наддиагональные матрицы объекта в абсолютной системе координат и системе координат схвата соответственно.

Возможность автоматизации решения задач кинематики с использованием излагаемого метода предполагает введение определённых правил, согласно которым ориентируются оси систем координат. В этом случае матрицы, входящие в состав уравнения (3.15) будут иметь типовую стандартную для данной системы конфигурацию. Так, если направлять оси x_i и x'_i вдоль i -го звена (рис. 3.6, а), то матрица этого звена будет иметь вид:

$$T_i = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

А матрица вращательной кинематической пары (рис. 3.6, б) будет выглядеть так:

$$T_{ji} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{(i+1)i} & -\sin \varphi_{(i+1)i} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{(i+1)i} & \cos \varphi_{(i+1)i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

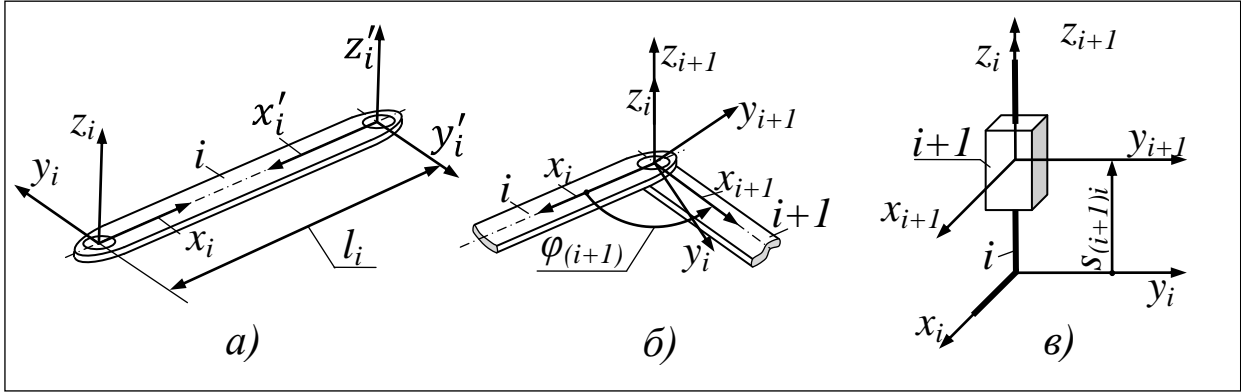


Рис. 3.6 Правила задания систем координат

В поступательной кинематической паре оси z_i и z_{i+1} направляют вдоль оси перемещения (рис. 3.6, в). Тогда матрица этой пары:

$$T_{ji} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_{(i+1)i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Матричное уравнение преобразования координат (3.15) эквивалентно системе n нелинейных уравнений относительно обобщённых координат. Эти координаты находятся в матрицах кинематических пар. Чтобы избавиться от нелинейности, разложим каждую матрицу кинематической пары в ряд Тейлора. Для этого представим точное значение обобщённой координаты в виде суммы: $q = \tilde{q} + \Delta q$, где \tilde{q} – приближённое значение обобщённой координаты, Δq – уточнение обобщённой координаты. Тогда для точного значения обобщённой координаты имеем:

$$T_{ji}(q) = T_{ji}(\tilde{q} + \Delta q) = T_{ji}(\tilde{q}) + \left. \frac{dT_{ji}}{dq} \right|_{q=\tilde{q}} \cdot \Delta q + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 T_{ji}}{dq^2} \right|_{q=\tilde{q}} \cdot \Delta q^2 + \dots$$

Отбрасывая слагаемые второго и выше порядков малости, получим:

$$T_{ji}(q) \approx T_{ji}(\tilde{q}) + \left. \frac{dT_{ji}}{dq} \right|_{q=\tilde{q}} \cdot \Delta q. \quad (3.19)$$

Представив операцию дифференцирования матрицы умножением линейного оператора дифференцирования Q на матрицу кинематической пары, получим:

$$T_{ji}(q) \approx T_{ji}(\tilde{q}) + Q \cdot T_{ji}(\tilde{q}) \cdot \Delta q = (E + Q \cdot \Delta q) \cdot T_{ji}(\tilde{q}), \quad (3.20)$$

где E – квадратная единичная матрица четвёртого порядка.

Линейные операторы дифференцирования для вращательной и поступательной кинематических пар соответственно выглядят так:

$$Q_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для точных значений обобщённых координат матричное уравнение (3.15) с учётом (3.20) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_{M_0} \approx & T_{10}(q_{10}) \cdot T_1 \cdot T_{21}(q_{21}) \cdot T_2 \cdot T_{32}(q_{32}) \cdot \dots \cdot T_{n(n-1)}(q_{n(n-1)}) \cdot P_{M_n} = \\ & (E + Q_{10} \cdot \Delta q_{10}) \cdot T_{10}(\tilde{q}_{10}) \cdot T_1 \cdot (E + Q_{21} \cdot \Delta q_{21}) \cdot T_{21}(\tilde{q}_{21}) \cdot T_2 \cdot \\ & (E + Q_{32} \cdot \Delta q_{32}) \cdot T_{32}(\tilde{q}_{32}) \cdot \dots \cdot (E + Q_{n(n-1)} \cdot \Delta q_{n(n-1)}) \cdot \\ & \cdot T_{n(n-1)}(\tilde{q}_{n(n-1)}) \cdot P_{M_n}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Раскрывая скобки и отбрасывая слагаемые второго и выше порядков малости, получим:

$$\begin{aligned} P_{M_0} \approx & Q_{10} \cdot T_{10}(\tilde{q}_{10}) \cdot T_1 \cdot T_{21}(\tilde{q}_{21}) \cdot T_2 \cdot T_{32}(\tilde{q}_{32}) \cdot \dots \\ & \cdot T_{n(n-1)}(\tilde{q}_{n(n-1)}) \cdot P_{M_n} \cdot \Delta q_{10} + T_{10}(\tilde{q}_{10}) \cdot T_1 \cdot Q_{21} \\ & \cdot T_{21}(\tilde{q}_{21}) \cdot T_2 \cdot T_{32}(\tilde{q}_{32}) \cdot \dots \cdot T_{n(n-1)}(\tilde{q}_{n(n-1)}) \cdot P_{M_n} \\ & \cdot \Delta q_{21} + \dots + T_{10}(\tilde{q}_{10}) \cdot T_1 \cdot T_{21}(\tilde{q}_{21}) \cdot T_2 \cdot T_{32}(\tilde{q}_{32}) \cdot \dots \\ & \cdot Q_{n(n-1)} \cdot T_{n(n-1)}(\tilde{q}_{n(n-1)}) \cdot P_{M_n} \cdot \Delta q_{n(n-1)} + \\ & + T_{10}(\tilde{q}_{10}) \cdot T_1 \cdot T_{21}(\tilde{q}_{21}) \cdot T_2 \cdot T_{32}(\tilde{q}_{32}) \cdot \dots \cdot T_{n(n-1)}(\tilde{q}_{n(n-1)}) \cdot \\ & P_{M_n}. \end{aligned}$$

Полученное *линейное* матричное уравнение решается относительно уточнений обобщённых координат $\Delta q_{(i+1)i}$. Эти значения служат для расчёта величин $\tilde{q}_{(i+1)i} + \Delta q_{(i+1)i}$. Они могут служить вновь начальными для получения последующего уточнения. Процесс уточнений может продолжаться до тех пор,

ка: $|\Delta q_{(i+1)i}| \leq \varepsilon$, где ε наперёд заданное малое число, характеризующее требуемую точность вычислений.

3.4 Контрольные вопросы

3.1 В чём заключается суть прямой и обратной задач кинематики манипуляторов?

3.2 Решение какой задач кинематики манипуляторов имеет более важное практическое значение?

3.3 Изложите суть метода преобразования координат.

3.4 В чём заключается необходимость использования численных методов при решении обратной задачи о положениях?

3.5 Как нелинейные уравнения кинематики манипуляторов заменить линейными?

4 Динамика манипуляторов

Проектирование промышленных роботов включает решение двух основных задач динамики – прямой и обратной. Определение усилий в кинематических парах (обратная задача) и выявление закона движения под действием приложенных сил (прямая задача) вызывает значительные трудности. Это объясняется тем, что манипуляторы, являющиеся основными исполнительными органами роботов, имеют большое число степеней свободы. Кроме того, промышленные роботы являются типичными динамическими объектами, работающими в неустановившихся режимах, велико взаимное влияние приводов, испытывающих значительные инерционные нагрузки. Рассмотрим решение основных задач динамики манипуляторов более подробно.

4.1 Обратная задача динамики манипуляторов

Наиболее простой способ решения обратной задачи динамики основан на использовании принципа Даламбера. Согласно этому принципу, динамическую систему можно рассматривать, как находящуюся в равновесии, если кроме реально действующей на неё системе внешних сил добавить условные *силы инерции*. Метод с использованием принципа Даламбера называют методом *кинетостатики* или проще – *силовым расчётом*. Он позволяет определить усилия приводов, необходимых для реализации заданного движения объекта, и вычислить реакции в кинематических парах манипулятора. Рассчитанные усилия приводов позволяют обосновать выбор мощности приводов, а найденные реакции – оптимально спроектировать элементы кинематических пар. Кроме того, силы инерции звеньев необходимы для прочностных расчётов и расчётов на жёсткость.

Как известно из теоретической механики, силы инерции элементарных масс i -го звена представляются *главным вектором сил инерции* – \bar{I}_i и *главным моментом сил инерции* – \bar{M}_i . Они определяются по формулам:

$$\bar{I}_i = -m_i \bar{a}_{S_i}, \quad \bar{M}_i = -J_{S_i} \bar{\varepsilon}_i, \quad (4.1)$$

где m_i – масса i -го звена; \bar{a}_{S_i} – ускорение центра масс i -го звена; J_{S_i} – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс i -го звена; $\bar{\varepsilon}_i$ – угловое ускорение i -го звена.

Силовой расчёт манипулятора выполняется в следующей последовательности.

1. С целью определения ускорений центров масс и вычисления угловых ускорений звеньев, производят кинематический анализ при заданных обобщённых координатах, скоростях и ускорениях.
2. Вычисляют силы инерции, приведя последние к центрам масс звеньев.
3. Поочерёдно размыкают кинематическую цепь манипулятора в каждой кинематической паре, начиная от схвата.
4. Составляют уравнения проекций всех активных сил и сил инерции звеньев свободной части на оси системы координат, связанной с последним звеном кинематической цепи, оставшейся после её отсоединения.
5. Составляют уравнения проекций моментов всех сил на эти же оси системы координат.
6. Составленные уравнения решают относительно неизвестных реакций и движущих сил, обеспечивающих заданный закон движения.

В зависимости от вида кинематической пары, определяемые в ней усилия имеют различную природу. На рис. 4.1 представлены вращательная (рис. 4.1, а) и поступательная (рис. 4.1, б) кинематические пары. Пунктиром показано отсоединённое после размыкания кинематической цепи звено.

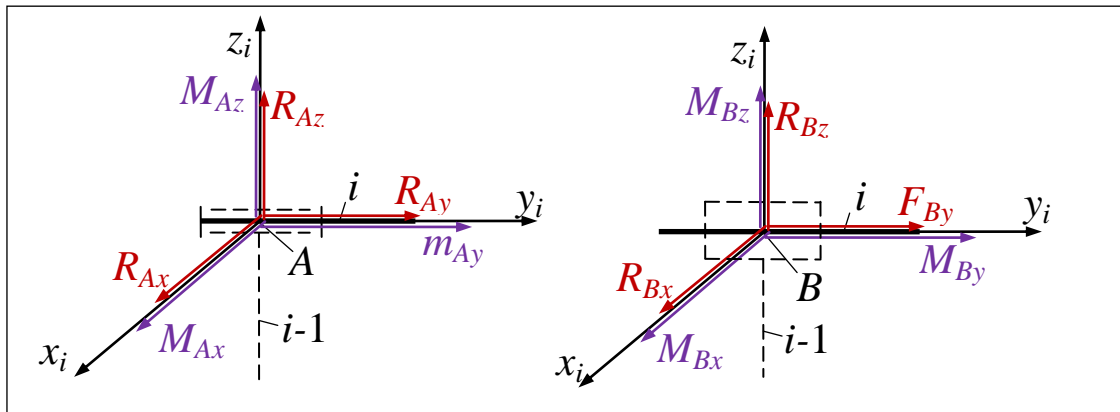


Рис. 4.1 Неизвестные силы в кинематических парах

Во вращательной кинематической паре A : R_{Ax} , R_{Ay} , R_{Az} – составляющие реакции, действующей на i звено со стороны $(i-1)$ -го звена; M_{Ax} , M_{Az} – составляющие пары сил, действующей на i звено со стороны $(i-1)$ -го звена; m_{Ay} – движущий момент, действующий на i звено со стороны двигателя, закреплённого на $(i-1)$ -ом звене.

В поступательной кинематической паре B : R_{Bx} , R_{Bz} – составляющие реакции, действующей на i звено со стороны $(i-1)$ -го звена; M_{Bx} , M_{By} , M_{Bz} – составляющие пары сил, действующей на i звено со стороны $(i-1)$ -го звена; F_{By} – движущая сила, действующая на i звено со стороны двигателя, закреплённого на $(i-1)$ -ом звене.

Покажем на примере манипулятора промышленного робота МП-9С решение обратной задачи динамики.

Пример. Приводы манипулятора (рис. 4.2) отработали известные обобщённые координаты – φ_{10} , s_{21} и s_{32} с заданными обобщёнными скоростями и ускорениями: $\dot{\varphi}_{10}$, \dot{s}_{21} , \dot{s}_{32} , $\ddot{\varphi}_{10}$, \ddot{s}_{21} , \ddot{s}_{32} . Длина звена 2 – l_{BC} . Положение центров масс звеньев определяется известными размерами

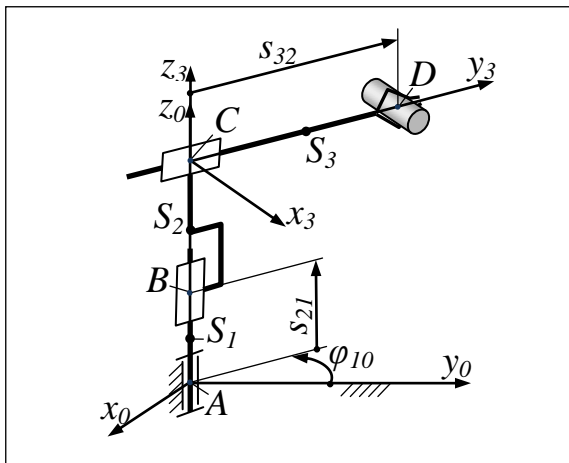


Рис. 4.2 Манипулятор робота МП-9С

– l_{AS_1} , l_{BS_2} , l_{DS_3} ¹⁰. В схвате манипулятора находится объект массой m . Известны массы звеньев – m_1 , m_2 , m_3 – и моменты инерции относительно главных центральных осей инерции¹¹. Необходимо определить реакции и движущие силы в кинематических парах A , B , и C .

Следуя методике силового расчёта, сначала решим прямую задачу об ускорениях. Нетрудно увидеть (см. рис. 4.2), что $\bar{a}_{S_1} = 0$, $\bar{a}_{S_2} = \ddot{s}_{21} \cdot \bar{k}_3$, где \bar{k}_3 – орт оси z_3 . Для определения ускорения центра масс S_3 разложим

¹⁰ Точка S_3 является общим центром масс звена 3 и объекта, находящегося в схвате.

¹¹ Главные оси инерции звена имеют своим началом центр масс звена. Относительно *центральных* осей инерции центробежные моменты инерции равны нулю, поэтому центральные оси инерции совпадают с осями симметрии звена.

движение звена 3 на переносное вместе со звеном 2 и относительное относительно звена 2. На этом основании запишем:

$$\bar{a}_{S_3} = \bar{a}_{S_2} + \bar{a}_{S_3 2} + \bar{a}_{S_3 2}^{\text{кор}}, \quad (4.2)$$

$$\text{где относительное ускорение } \bar{a}_{S_3 2} = \ddot{s}_{32} \cdot \bar{j}_3. \quad (4.3)$$

Ускорение Кориолиса:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{S_3 2}^{\text{кор}} &= 2 \cdot \bar{\omega}_{\text{пер}} \times \bar{v}_{\text{отн}} = 2 \cdot \dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32} (\bar{k}_3 \times \bar{j}_3) = \\ &= 2 \cdot \dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32} \cdot \bar{l}_3. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Определим теперь переносное ускорение \bar{a}_{S_2} . Для этого разложим движение звена 2 на переносное вместе со звеном 1 и относительное относительно звена 1. На этом основании запишем:

$$\bar{a}_{S_2} = \bar{a}_{S_1} + \bar{a}_{S_2 1} + \bar{a}_{S_2 1}^{\text{кор}}. \quad (4.5)$$

Для нового разложения имеем: переносное ускорение

$$\bar{a}_{S_1} = \bar{a}_{S_1}^n + \bar{a}_{S_1}^r = -\dot{\phi}_{10}^2 (s_{32} - l_{DS_3}) \cdot \bar{j}_3 - \ddot{\phi}_{10} (s_{32} - l_{DS_3}) \cdot \bar{l}_3, \quad (4.6)$$

относительное ускорение

$$\bar{a}_{S_2 1} = \ddot{s}_{21} \cdot \bar{k}_3, \quad (4.7)$$

ускорение Кориолиса $\bar{a}_{S_2 1}^{\text{кор}} = 2 \cdot \dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{21} (\bar{k}_3 \times \bar{k}_3) = 0$.

Подставляя (4.7) и (4.6) в (4.5), а (4.5), (4.4) и (4.3) в (4.2), окончательно получим:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{S_3} &= [2 \dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32} - \ddot{\phi}_{10} (s_{32} - l_{DS_3})] \cdot \bar{l}_3 + \\ &+ [\ddot{s}_{32} - \dot{\phi}_{10}^2 (s_{32} - l_{DS_3})] \cdot \bar{j}_3 + \ddot{s}_{21} \cdot \bar{k}_3. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Угловые ускорения звеньев:

$$\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_2 = \bar{\varepsilon}_3 = \ddot{\phi}_{10} \cdot \bar{k}_3. \quad (4.9)$$

Таким образом, ускорения центров масс и угловые ускорения звеньев найдены. Приступим к определению сил инерции.

Звено 1. Центр масс неподвижен, поэтому главный вектор сил инерции $\bar{I}_1 = 0$. Главный момент сил инерции $\bar{M}_1 = \bar{M}_{x_1} + \bar{M}_{y_1} + \bar{M}_{z_1} = 0 \cdot \bar{l}_1 + 0 \cdot \bar{j}_1 - J_{z_1} \ddot{\phi}_{10} \cdot \bar{k}_1$, где J_{z_1} – момент инерции звена 1 относительно главной центральной оси инерции, параллельной оси z_3 (оси инерции системы координат звена 1 на рис. (4.2) не показаны).

Звено 2. Главный вектор сил инерции $\bar{I}_2 = \bar{I}_{z_2} = -m_2 \ddot{s}_{21} \cdot \bar{k}_2$, где \bar{k}_2 – орт системы координат звена 2. Эти оси являются главными центральными осями инерции звена, они параллельны осям x_3, y_3, z_3 и на рис. (4.2) также не показаны. Главный момент сил инерции $\bar{M}_2 = \bar{M}_{z_2} = -J_{z_2} \ddot{\phi}_{10} \cdot \bar{k}_2$.

Звено 3. Используя результат (4.8), определим главный вектор сил инерции:

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 = \bar{I}_{x_3} + \bar{I}_{y_3} + \bar{I}_{z_3} = m_3 [\ddot{\phi}_{10}(s_{32} - l_{DS_3}) - 2\dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32}] \cdot \bar{i}_3 + \\ + m_3 [\dot{\phi}_{10}^2(s_{32} - l_{DS_3}) - \ddot{s}_{32}] \cdot \bar{j}_3 - m_3 \ddot{s}_{21} \cdot \bar{k}_3. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Главный момент сил инерции $\bar{M}_3 = \bar{M}_{z_3} = -J_{z_3} \ddot{\phi}_{10} \cdot \bar{k}_3$.

Т.к. силы инерции всех звеньев найдены, поочерёдно разомкнём схему манипулятора в кинематических парах C, B, A , начиная от схвата. Результат размыкания с указанными на расчётных схемах силами и моментами представлен на рис. (4.3). Неизвестные силы и моменты показаны пунктиром.

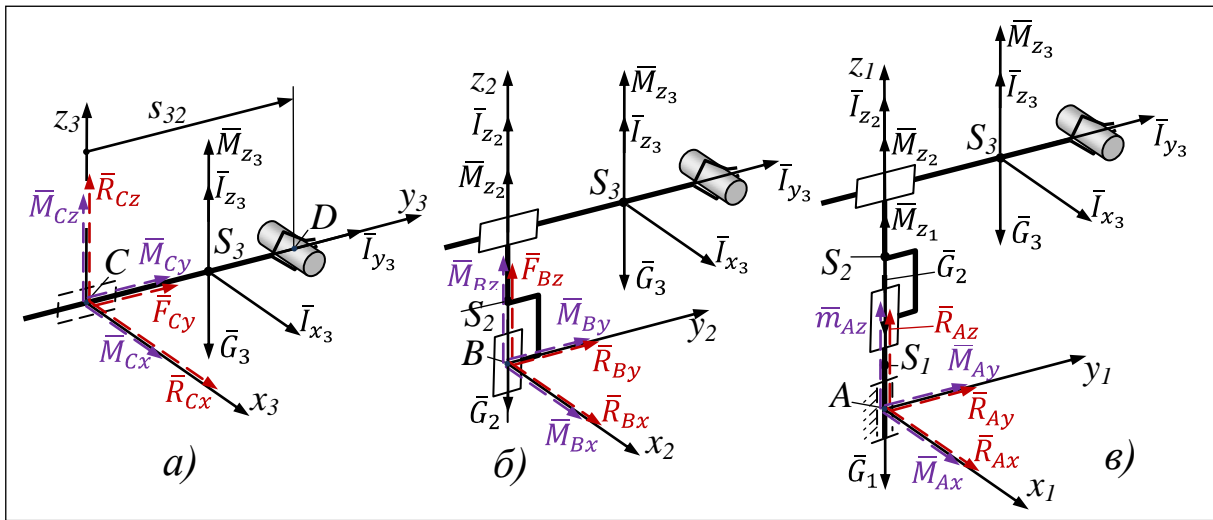


Рис. 4.3 Расчётные схемы манипулятора

Определим усилия в кинематической паре C (рис. 4.3, а). Для этого составим уравнения равновесия в векторной форме:

$$\bar{G}_3 + \bar{I}_3 + \bar{R}_C = 0, \quad (4.11)$$

где \bar{G}_3 – сила тяжести звена 3 вместе с объектом, модуль которой определяется по формуле $G_3 = m_3 g + mg$.

$$\bar{M}_3 + \overline{CS}_3 \times \bar{G}_3 + \overline{CS}_3 \times \bar{I}_3 + \bar{M}_C = 0. \quad (4.12)$$

Записывая уравнения (4.11) и (4.12) в скалярной форме и решая их относительно неизвестных сил и моментов, получим:

$$\begin{aligned} R_{C_x} &= -m_3 [\ddot{\phi}_{10}(s_{32} - l_{DS_3}) - 2\dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32}]; \\ F_{C_y} &= -m_3 [\dot{\phi}_{10}^2(s_{32} - l_{DS_3}) - \ddot{s}_{32}]; \\ R_{C_z} &= m_3 g + mg + m_3 \ddot{s}_{21}; \\ M_{C_x} &= (m_3 g + m_3 \ddot{s}_{21})(s_{32} - l_{DS_3}); \\ M_{C_y} &= 0; \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$M_{Cz} = J_{z_3} \ddot{\phi}_{10} + m_3 [\dot{\phi}_{10} (s_{32} - l_{DS_3}) - 2 \dot{\phi}_{10} \cdot \dot{s}_{32}] (s_{32} - l_{DS_3}).$$

Таким образом, реакции и движущая сила в кинематической паре C найдены. Аналогично, используя расчётные схемы (рис. 4.3, б, в), определяются реакции и движущие силы в кинематических парах B и A .

В заключение приведённого примера отметим, что выражение (4.13) есть дифференциальное уравнение движения звена 3 манипулятора. Оно входит в систему дифференциальных уравнений, описывающих движение манипулятора. Следовательно, приведённый пример описывает один из методов составления дифференциальных уравнений, необходимых при решении прямой задачи динамики манипуляторов – определение закона движения при заданных внешних силах.

4.2 Силовой расчёт манипуляторов матричным методом

Рассмотренный выше пример иллюстрирует значительную трудоёмкость и ограниченную возможность автоматизации силового расчёта. Кроме этого, наличие в кинематической

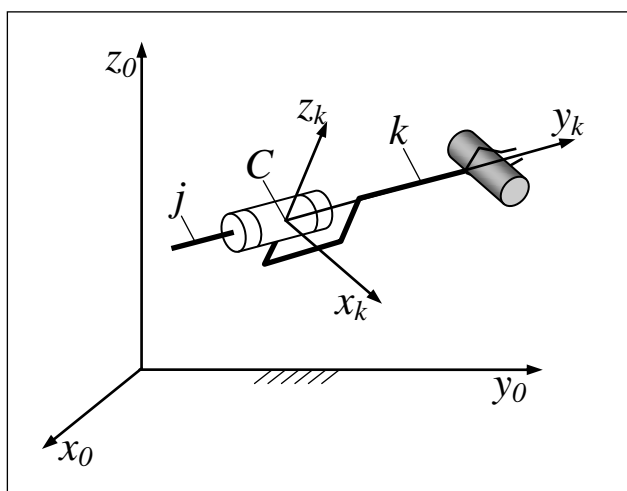


Рис. 4.4 Кинематическая пара манипулятора

схеме двух и более вращательных кинематических пар приводит к необходимости использования метода преобразования координат для нахождения ускорений центров масс звеньев. Как показано в главе 3, он наиболее эффективен в матричной форме. Следовательно, логическим продолжением метода преобразования координат в матричной форме является силовой расчёт матричным методом. Рассмотрим этот метод более подробно.

Пусть со звеном k манипулятора (рис. 4.4) связана система координат $x_k y_k z_k$. Полагаем, что оси системы координат являются главными центральными осями инерции звена k .

Как известно, компоненты реакции звена j на звено k определяются из условия, что после приведения к началу координат C главный вектор \bar{R}_C и главный момент \bar{M}_C реакций всех связей, а также внешних сил и сил инерции звена k , их сумма будет равна нулю. Отсюда вытекают известные уравнения равновесия, записанные в матричной форме (все слагаемые – столбцовые матрицы):

$$\bar{R}_C + \bar{G}_k + \bar{I}_k = 0; \quad (4.14)$$

$$\bar{M}_C + \bar{M}_G + \bar{M}_I + \bar{M}_u = 0, \quad (4.15)$$

где неизвестными являются \bar{R}_C и \bar{M}_C : $\bar{R}_C = [R_{C_x}; R_{C_y}; R_{C_z}]^T$ – столбцовая матрица¹² проекций реакции на оси системы координат звена k , $\bar{M}_C = [M_{C_x}; m_{C_y}; M_{C_z}]^T$ – столбцовая матрица проекций момента на те же оси. Величина m_{C_y} , входящая в эту матрицу, есть неизвестный движущий момент в кинематической паре C .

Столбцовые матрицы других сил и моментов, входящих в уравнения (4.14) и (4.15), будут рассмотрены ниже. Задача силового расчета сводится, таким образом, к определению проекций сил и моментов на оси системы координат звена.

Начнем с определения проекций внешних сил. Внешними силами в рассматриваемой задаче являются силы тяжести \bar{G} . Для конечного звена манипулятора \bar{G}_k (рис. 4.4) есть равнодействующая сил тяжести звена и объекта, находящегося в схвате. Точкой приложения равнодействующей является их общий центр масс. В матричной форме проекции силы тяжести звена k на собственные оси представляются как

$$\bar{G}_k = T_{0k}^v \cdot \bar{G}_0, \quad (4.16)$$

где \bar{G}_0 – столбцовая матрица проекций силы тяжести k -го звена на оси неподвижной системы координат ($\bar{G}_0 = [0; 0; -m_k g]^T$); T_{0k}^v – матрица преобразования какого-либо вектора v из неподвижной системы в систему k ; m_k – масса k -го звена; g – ускорение свободного падения.

Матрица преобразования вектора может быть получена из матрицы преобразования координат точки T_{k0} путем удаления

¹² С целью экономии места для записи столбцовой матрицы здесь и далее в этом параграфе, последняя записана в форме транспонированной матрицы-строки.

четвертой строки и четвертого столбца. Полученную матрицу T_{k0}^v необходимо транспонировать, чтобы получить матрицу T_{0k}^v . При транспонировании строки исходной матрицы становятся столбцами транспонированной.

Столбцовая матрица проекций главного вектора сил инерции звена k на собственные оси получается по формуле

$$\bar{I}_k = -m_k \cdot T_{0k}^v \cdot (\ddot{T}_{k0} \cdot \bar{r}_s), \quad (4.17)$$

где \ddot{T}_{k0} – вторая производная по времени от матрицы T_{k0} ; \bar{r}_s – столбцовая матрица координат центра масс k -го звена в своей системе.

Произведение в скобках представляет собой матрицу–столбец проекций ускорения \bar{a}_s на неподвижные оси. При умножении T_{0k}^v на этот столбец четвертый элемент последнего отбрасывается.

Перейдем к определению проекций моментов на оси системы координат k -го звена. Момент какой-либо силы \bar{F} относительно начала этой системы:

$$\bar{M}_F = \bar{r} \times \bar{F},$$

где \bar{r} – радиус-вектор точки приложения силы.

Проекции этого момента образуют матрицу–столбец из определителей:

$$\bar{M}_F = [M_{F_x} \quad M_{F_y} \quad M_{F_z}]^T = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} r_y & r_z & - & r_x & r_z & r_x & r_y \\ F_y & F_z & & F_x & F_z & F_x & F_y \end{array} \right]^T, \quad (4.18)$$

где $M_{F_x} = r_y \cdot F_z - r_z \cdot F_y$, $M_{F_y} = r_z \cdot F_x - r_x \cdot F_z$, $M_{F_z} = r_x \cdot F_y - r_y \cdot F_x$. Вышесказанное проиллюстрировано на рис. 4.5.

Моменты относительно точки C создаёт сила тяжести – \bar{G}_k , и сила инерции – \bar{I}_k . Точка приложения этих сил общая – центр масс звена. Поэтому в первую строку определителей подставляются координаты центра масс k -го звена в собственной системе, а во вторую – либо проекции силы тяжести, либо проекции главного вектора сил инерции, полученные из формул (4.16) и (4.17), соответственно.

Проекции главного момента сил инерции на оси звена образуют столбец:

$$\bar{M}_u = \begin{bmatrix} -J_x \dot{\omega}_x - (J_z - J_y) \omega_z \omega_y \\ -J_y \dot{\omega}_y - (J_x - J_z) \omega_x \omega_z \\ -J_z \dot{\omega}_z - (J_y - J_x) \omega_y \omega_x \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

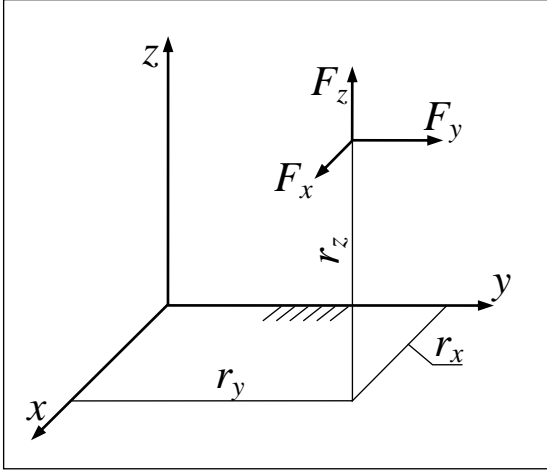


Рис. 4.5 К определению проекций момента силы

где J_x, J_y, J_z – моменты инерции относительно главных центральных осей инерции звена.

Проекция угловой скорости звена на собственные оси определяет матрица-столбец:

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_2 \alpha_3 + \dot{\beta}_2 \beta_3 + \dot{\gamma}_2 \gamma_3 \\ \dot{\alpha}_1 \alpha_3 + \dot{\beta}_1 \beta_3 + \dot{\gamma}_1 \gamma_3 \\ \dot{\alpha}_1 \alpha_2 + \dot{\beta}_1 \beta_2 + \dot{\gamma}_1 \gamma_2 \end{bmatrix}$$

где α, β, γ – элементы матрицы T_{k0}^v , расположенные, как показано ниже:

$$T_{k0}^v = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Таким образом, определены проекции всех сил и моментов на оси системы координат k -го звена. После этого по уравнениям (4.14) и (4.15) можно определить неизвестные реакции и движущий момент, перейдя от матричных уравнений к шести скалярным уравнениям равновесия.

4.3 Прямая задача динамики манипуляторов

Выше было отмечено, что метод кинетостатики позволяет получать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение манипуляторов. Однако, этот метод не получил широкого распространения в расчётной практике. В настоящее время

более предпочтительным и эффективным методом составления этих уравнений является метод, основанный на использовании уравнений Лагранжа второго рода в матричной форме. Использование этих уравнений позволяет разработать эффективные алгоритмы автоматизированного анализа манипуляторов. Достоинством также является универсальность и удобство учёта упругих свойств звеньев. Как известно, число уравнений Лагранжа второго рода равно числу степеней свободы механической системы. Для манипулятора с n степенями свободы эти уравнения записываются так:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} - \frac{\partial L}{\partial q_1} = Q_1; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} - \frac{\partial L}{\partial q_2} = Q_2; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} - \frac{\partial L}{\partial q_3} = Q_3; \\ \dots \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} - \frac{\partial L}{\partial q_n} = Q_n, \end{cases} \quad (4.21)$$

где L – функция Лагранжа, равная разности кинетической и потенциальной энергий манипулятора ($L = K - \Pi$); $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ – обобщённые координаты; $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ – обобщённые силы, в состав которых входят только непотенциальные силы¹³.

Матричный метод из-за своей универсальности и возможности автоматизации расчётов используется при определении параметров, входящих в уравнения (4.21). Такими параметрами являются: кинетическая и потенциальная энергии, обобщённая сила. Рассмотрим их более подробно.

Кинетическая энергия материальной точки массой dm i -го звена (рис. 4.6) в матричной форме записывается так:

$$dK_i = \frac{1}{2} tr(\dot{R}_0 \cdot \dot{R}_0^T) dm, \quad (4.22)$$

где символом tr обозначен след квадратной матрицы (сумма элементов главной диагонали), являющейся результатом произведения столбцовой матрицы на матрицу-строку.

¹³ Источником потенциальных сил является потенциальное поле, например гравитационное, поэтому силы тяжести – это потенциальные силы. Непотенциальные силы – движущие, силы полезного сопротивления на схвате при выполнении основной технологической операции и т.п.

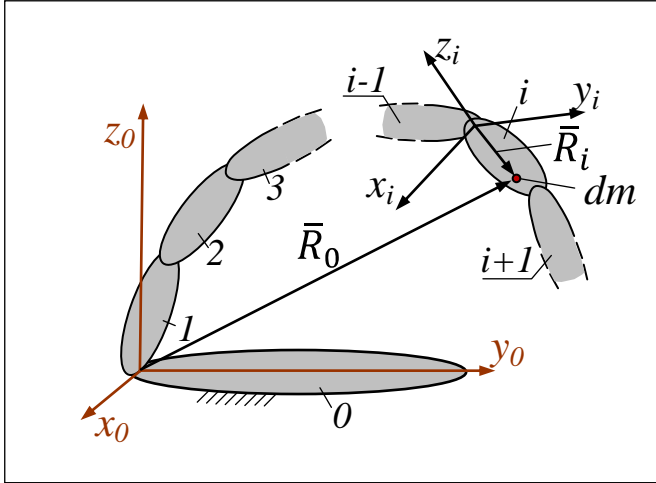


Рис. 4.6 К определению кинетической энергии звена

$\dot{T}_{i0} \cdot R_i$ и учитывая свойство транспонирования произведения двух матриц¹⁴, получим:

$$dK_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_{i0} R_i R_i^T \dot{T}_{i0}^T) dm, \quad (4.23)$$

Проинтегрировав это выражение по объёму i -го звена – V_i , получим его кинетическую энергию:

$$K_i = \frac{1}{2} \text{tr} \int_{V_i} (\dot{T}_{i0} R_i R_i^T \dot{T}_{i0}^T) dm. \quad (4.24)$$

Не меняя последовательности расположения матриц, вынесем за знак интеграла матрицы преобразования, т.к. они не зависят от координат точек звена:

$$K_i = \frac{1}{2} \text{tr} \left[\dot{T}_{i0} \left(\int_{V_i} R_i R_i^T dm \right) \dot{T}_{i0}^T \right] = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_{i0} H_i \dot{T}_{i0}^T). \quad (4.25)$$

В этой формуле интеграл обозначен через H_i . Он называется *тензором инерции* звена. Вычислим его:

$$H_i = \int_{V_i} R_i R_i^T dm = \int_{V_i} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} [x_i \quad y_i \quad z_i \quad 1] dm =$$

Элементами столбцовой матрицы $\dot{R}_0 = \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \end{bmatrix}$ являются проекции скорости массы dm на оси абсолютной системы координат или, что то же самое, производные координат точки массой dm в этой же системе.

Используя формулу преобразования $\dot{R}_0 =$

¹⁴ Результатом транспонирования произведения двух матриц является произведение транспонированных сомножителей, переставленных местами – $(AB)^T = B^T A^T$.

$$= \int_{V_i} \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i & x_i \\ y_i x_i & y_i^2 & y_i z_i & y_i \\ z_i x_i & z_i y_i & z_i^2 & z_i \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix} dm = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} & m_i x_i^* \\ J_{xy} & J_{yy} & J_{yz} & m_i y_i^* \\ J_{xz} & J_{yz} & J_{zz} & m_i z_i^* \\ m_i x_i^* & m_i y_i^* & m_i z_i^* & m_i \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

где J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – осевые моменты инерции i -го звена; J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – центробежные моменты инерции; x_i^*, y_i^*, z_i^* – координаты центра масс i -го звена в собственной системе координат; m_i – масса i -го звена.

Таким образом, тензор инерции звена интегральным образом характеризует его инерционность – массу, распределение массы по осям системы координат, с ним связанной, положение центра масс в этой же системе.

Кинетическая энергия всего манипулятора, состоящего из n звеньев, будет равна:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n tr(\dot{T}_{i0} H_i \dot{T}_{i0}^T). \quad (4.27)$$

Потенциальная энергия звена в данном положении – скалярная величина Π , равная той работе, которую произведут силы поля при перемещении этого звена из этого положения в нулевое. В матричной форме потенциальная энергия i -го звена массой m_i :

$$\Pi_i = -m_i G^T T_{i0} R_i^*, \quad (4.28)$$

где G^T – матрица-строка вида $G^T = [0 \ 0 \ -g \ 0]$; R_i^* – матрица-столбец, первые три элемента которой – координаты центра масс i -го звена в собственной системе координат.

Тогда потенциальную энергию всего манипулятора, имеющего n звеньев можно вычислить по формуле:

$$\Pi = -\sum_{i=1}^n (m_i G^T T_{i0} R_i^*). \quad (4.29)$$

Обобщённая сила – скалярная величина, равная отношению суммы возможных работ сил, приложенных к звеньям манипулятора, при изменении только данной обобщённой координаты к изменению этой координаты¹⁵:

$$Q_i = \delta A / \delta q_i, \quad (4.30)$$

¹⁵ В механических системах с одной степенью свободы обобщённую силу принято называть *приведённой* силой или *приведённым* моментом. Действительно, если звено приведения совершает вращательное движение, то приведённый момент: $M_{\Pi} = \frac{N}{\omega_i} = (\delta A / \delta t) / (\delta q_i / \delta t) = \delta A / \delta q_i$.

где δA – элементарная работа приложенных сил на таком возможном перемещении манипулятора, при котором только одна его обобщённая координата q_i получает приращение δq_i , в то время как все остальные не меняются. Если обобщённая координата q_i – угол поворота, то обобщённая сила – момент, т.е. пара сил.

Рассмотрим методику определения обобщённой силы на примере манипулятора обобщённой структуры (рис. 4.7). На его схват действует сила \bar{F}_0 и момент \bar{M}_0 . Векторы \bar{F}_0 и \bar{M}_0 заданы

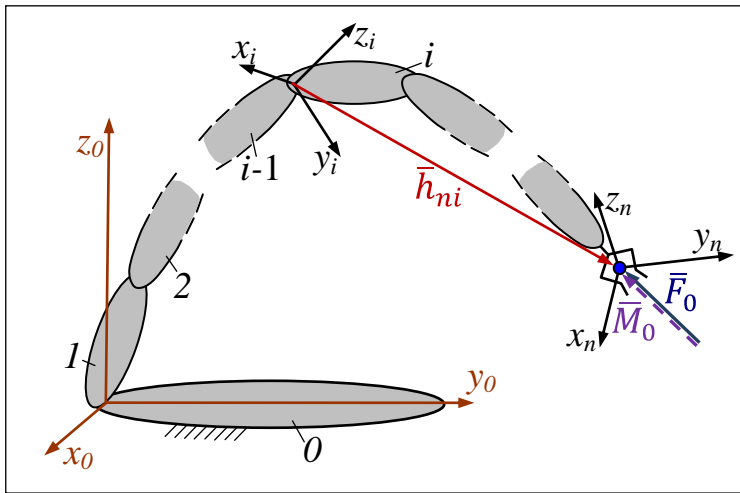


Рис. 4.7 К определению обобщённой силы

своими проекциями на оси абсолютной системы координат

$$(x_0 y_0 z_0): \quad \bar{F}_0 = \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix},$$

$$\bar{M}_0 = \begin{bmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{bmatrix}. \quad \text{Это одна}$$

из распространённых ситуаций работы манипулятора промышленного робота, выполняющего основную технологическую операцию, например сборочную. Требуется определить обобщённую силу, соответствующую обобщённой координате кинематической пары между i и $i-1$ звеньями.

Запишем \bar{F}_0 и \bar{M}_0 в системе координат i -го звена, используя матрицу преобразования векторов из абсолютной системы координат в систему i -го звена:

$$\bar{F}_i = \begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = T_{0i}^v \cdot \bar{F}_0, \quad \bar{M}_i = \begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} = T_{0i}^v \cdot \bar{M}_0. \quad (4.31)$$

Перенесём векторы \bar{F}_i и \bar{M}_i в начало i -й системы. Если момент \bar{M}_i можно свободно переносить по звену, то перенос силы \bar{F}_i в начало i -й системы сопровождается появлением дополнительного момента:

$$\Delta \bar{M}_i = \bar{h}_{ni} \times \bar{F}_i, \quad (4.32)$$

где \bar{h}_{ni} – радиус-вектор, идущий из начала i -й системы в начало системы схвата, записанный в i -й системе (рис. 4.7).

Таким образом, при приведении сил к центру i -й системы получаем главные вектор и момент, равные соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{F}^{\Gamma L} &= \bar{F}_i, \\ \bar{M}^{\Gamma L} &= \bar{M}_i + \bar{h}_{ni} \times \bar{F}_i. \end{aligned}$$

Определим теперь обобщённую силу соответствующую обобщённой координате q_i между i и $i-1$ звеньями.

Если звенья i и $i-1$ образуют поступательную кинематическую пару, то возможным является поступательное перемещение звена i вдоль, например, оси z_i на величину δq_i . В этом случае момент $\bar{M}^{\Gamma L}$ работы не производит, а сила $\bar{F}^{\Gamma L}$ совершает работу: $\delta A_i = \bar{F}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i \cdot \delta q_i$, где \bar{k}_i – орт оси z_i . Тогда обобщённая сила:

$$Q_i = \frac{\bar{F}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i \cdot \delta q_i}{\delta q_i} = \bar{F}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i = F_i \cos(\widehat{\bar{F}_i; k_i}). \quad (4.33)$$

Полученный результат показывает, что *обобщённая сила в поступательной кинематической паре равна проекции силы \bar{F}_i на ось этой пары.*

Если же звенья образуют вращательную пару, то возможное движение – вращательное на угол δq_i вокруг оси z_i . В этом случае, наоборот сила $\bar{F}^{\Gamma L}$, приложенная к точке оси вращения, работы не совершает, а работа главного момента: $\delta A_i = \bar{M}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i \cdot \delta q_i$.

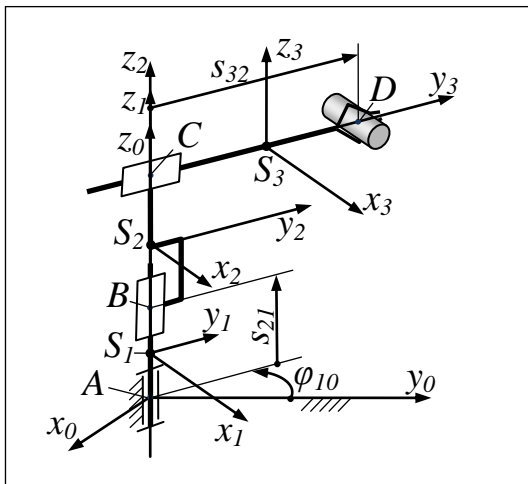


Рис. 4.8 Системы координат манипулятора работа МП-9С

Тогда:

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{\bar{M}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i \cdot \delta q_i}{\delta q_i} = \bar{M}^{\Gamma L} \cdot \bar{k}_i = \\ &= M^{\Gamma L} \cos(\widehat{\bar{F}_i; k_i}). \end{aligned} \quad (4.34)$$

В этом случае *обобщённая сила равна проекции главного момента $\bar{M}^{\Gamma L}$ на ось вращательной кинематической пары.*

Так как параметры, входящие в уравнения Лагранжа второго рода (4.21), определены, можно приступить к решению этих уравнений.

Рассмотрим решение прямой

задачи динамики на примере манипулятора промышленного робота МП-9С. Пусть оси подвижных систем координат звеньев являются их главными центральными осями инерции (рис. 4.8). Известны движущие силы в кинематических парах B и C – F_{B_z} , F_{C_y} , соответственно; движущий момент в паре A – m_{A_z} . Заданы массы и моменты инерции звеньев относительно главных центральных осей инерции. Известны также размеры звеньев и положение их центров масс.

Решение. Запишем уравнения Лагранжа второго рода. Каждой из трёх обобщённых координат – φ_{10} , s_{21} , s_{32} – будет соответствовать своё уравнение:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{10}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{10}} = Q_{10} \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{21}} - \frac{\partial L}{\partial s_{21}} = Q_{21} \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{32}} - \frac{\partial L}{\partial s_{32}} = Q_{32} \end{cases} \quad (4.35)$$

Определим параметры, входящие в уравнения (4.35). Функция Лагранжа: $L = K - \Pi$. Кинетическую энергию манипулятора K определим по формуле (4.27). Для этого воспользуемся матрицами преобразования:

$$T_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{AS_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.36)$$

$$T_{20} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_{21} + l_{BS_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.37)$$

$$T_{30} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & (l_{DS_3} - s_{32}) \sin \varphi_{10} \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 & (s_{32} - l_{DS_3}) \cos \varphi_{10} \\ 0 & 0 & 1 & s_{21} + l_{BC} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

Тогда формула (4.27) для нашего манипулятора будет выглядеть так:

$$K = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_{10} H_1 \dot{T}_{10}^T) + \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_{20} H_2 \dot{T}_{20}^T) + \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_{30} H_3 \dot{T}_{30}^T), \quad (4.39)$$

где тензоры инерции звеньев:

$$H_i = \begin{bmatrix} J_{xx}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i \end{bmatrix}. \quad (4.40)$$

После дифференцирования матриц (4.36), (4.37) и (4.38), получим:

$$\dot{T}_{10} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{10} & -\cos \varphi_{10} & 0 & 0 \\ \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\varphi}_{10},$$

$$\dot{T}_{20} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{10} & -\cos \varphi_{10} & 0 & 0 \\ \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{s}_{21}/\dot{\varphi}_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\varphi}_{10},$$

$$\dot{T}_{30} = \begin{bmatrix} A & C & 0 & (l_{DS_3} - s_{32}) \cos \varphi_{10} - (\dot{s}_{32}/\dot{\varphi}_{10}) \sin \varphi_{10} \\ B & A & 0 & (l_{DS_3} - s_{32}) \sin \varphi_{10} + (\dot{s}_{32}/\dot{\varphi}_{10}) \cos \varphi_{10} \\ 0 & 0 & 0 & \dot{s}_{21}/\dot{\varphi}_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\varphi}_{10},$$

где $A = -\sin \varphi_{10}$, $B = \cos \varphi_{10}$, $C = -\cos \varphi_{10}$.

После транспонирования матриц \dot{T}_{10} , \dot{T}_{20} , \dot{T}_{30} и вычислений по формуле (4.39), получим окончательно:

$$K = \frac{1}{2} J_z^{(1)} \dot{\varphi}_{10}^2 + \frac{1}{2} J_z^{(2)} \dot{\varphi}_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{s}_{21}^2 + \frac{1}{2} J_z^{(3)} \dot{\varphi}_{10}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{s}_{21}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{s}_{32}^2 + \frac{1}{2} m_3 (s_{32} - l_{DS_3})^2 \dot{\varphi}_{10}^2, \quad (4.41)$$

где $J_z^{(1)} = J_{xx}^{(1)} + J_{yy}^{(1)}$, $J_z^{(2)} = J_{xx}^{(2)} + J_{yy}^{(2)}$, $J_z^{(3)} = J_{xx}^{(3)} + J_{yy}^{(3)}$ – моменты инерции звеньев относительно собственных главных центральных осей инерции z_i , равные сумме осевых моментов инерции.

Разумеется, выражение (4.41) можно было получить более простым способом, анализируя движение каждого звена как составное и записывая его кинетическую энергию как сумму в каждом из составных движений. Однако это возможно только для простых структурных схем манипуляторов, имеющих не более одной вращательной кинематической пары. Наша цель – изуче-

ние универсальной методики, применимой для манипуляторов любой сложности.

Определим теперь потенциальную энергию манипулятора по формуле (4.29). Для этого воспользуемся матрицами преобразования (4.36), (4.37) и (4.38). Ввиду того, что центр масс каждого из подвижных звеньев совпадает с началом его системы координат, первые три элемента столбцовой матрицы R_i^* будут нулевыми. В результате вычислений получим:

$$\Pi = m_1 g l_{AS_1} + m_2 g (s_{21} + l_{BS_2}) + m_3 g (s_{21} + l_{BC}). \quad (4.42)$$

Таким образом, после вычитания (4.42) из (4.41) функция Лагранжа второго рода будет определена.

Найдём обобщённые силы. Из непотенциальных сил на манипулятор действуют только движущие силы F_{B_z} , F_{C_y} и движущий момент m_{A_z} . На ось поступательной кинематической пары C сила F_{B_z} проецируется в точку, а сила F_{C_y} – в натуральную величину. Следовательно, $Q_{32} = F_{C_y}$. Анализируя таким же образом кинематические пары A и B , получим: $Q_{10} = m_{A_z}$, $Q_{21} = F_{B_z}$.

Возьмём теперь частные производные от функции Лагранжа, входящие в уравнения (4.35).

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{10}} = \left[J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_z^{(3)} + m_3 (s_{32} - l_{DS_3})^2 \right] \dot{\varphi}_{10};$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_{10}} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{21}} = (m_2 + m_3) \dot{s}_{21};$$

$$\frac{\partial L}{\partial s_{21}} = -(m_2 + m_3) g;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{32}} = m_3 \dot{s}_{32};$$

$$\frac{\partial L}{\partial s_{32}} = m_3 (s_{32} - l_{DS_3}) \dot{\varphi}_{10}^2.$$

Определив частные производные и продифференцировав $\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{10}}$, $\frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{21}}$ и $\frac{\partial L}{\partial \dot{s}_{32}}$ по времени, получим систему уравнений (4.35) в виде:

$$\begin{cases} [J_z^{(1)} + J_z^{(2)} + J_z^{(3)} + m_3(s_{32} - l_{DS_3})^2] \ddot{\varphi}_{10} + \\ \quad + 2m_3(s_{32} - l_{DS_3}) \dot{s}_{32} \dot{\varphi}_{10} = m_{A_z}; \\ (m_2 + m_3) \ddot{s}_{21} + (m_2 + m_3)g = F_{B_z}; \\ m_3 \ddot{s}_{32} - m_3(s_{32} - l_{DS_3}) \dot{\varphi}_{10}^2 = F_{C_y}. \end{cases} \quad (4.43)$$

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка описывает поведение манипулятора как динамической системы с тремя степенями свободы. Убедимся в том, последнее уравнение системы совпадает с уравнением (4.13), полученным методом Даламбера, что подтверждает его правильность. Решить полученную систему относительно обобщённых координат можно численным методом.

Для иллюстрации полного решения прямой задачи динамики рассмотрим самый простой случай – манипулятор с одной степенью свободы (рис. 4.9).

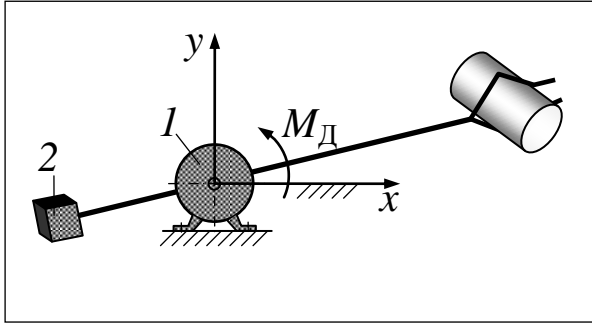


Рис. 4.9 Манипулятор с одной степенью свободы

Схват манипулятора приводится в действие мотор-редуктором 1, состоящим из асинхронного двигателя переменного тока и редуктора с передаточным отношением u . Механическая характеристика

двигателя – $M_D = a - b\omega_p$, где a и b – константы, определяемые маркой двигателя и качеством его изготовления, ω_p – угловая скорость ротора двигателя. Схват уравновешен противовесом 2 таким образом, что общий центр масс противовеса, схвата и объекта, находящегося в нём, совпадает с осью ротора. Момент инерции схвата с объектом относительно этой оси – J . Момент инерции ротора двигателя – J_p . Требуется определить закон движения схвата: $\omega = \omega(t)$, $\varphi = \varphi(t)$.

Решение. Запишем уравнение Лагранжа второго рода, описывающего движение манипулятора:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = Q. \quad (4.44)$$

Определим функцию Лагранжа $L = K - \Pi = \frac{1}{2}J_p\omega_p^2 + \frac{1}{2}J\omega^2 - 0$. Потенциальная энергия манипулятора равна нулю, т.к. центры масс подвижных звеньев (ротора и схвата) совпадают с началом абсолютной системы координат $xу$. К схвату приложен момент M , вектор которого совпадает с осью вращательной пары. Тогда обобщённая сила $Q = M = M_D u$. Взяв частные производные и продифференцировав $\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}$ по времени, получим:

$$J_p \dot{\omega}_p + J \dot{\omega} = M_D u. \quad (4.45)$$

Учитывая, что $\omega_p = \omega u$ и $M_D = a - b\omega_p$, перепишем уравнение (4.45):

$$J_p \dot{\omega} u + J \dot{\omega} = a u - b \omega u^2. \quad (4.46)$$

Решим полученное дифференциальное уравнение, разделяя переменные ω и t :

$$(J_p u + J) \frac{d\omega}{a u - b u^2 \omega} = dt. \quad (4.47)$$

После интегрирования получим:

$$-\frac{J_p u + J}{b u^2} \ln \left| \omega - \frac{a}{b u} \right| = t + c_1. \quad (4.48)$$

Постоянную интегрирования c_1 определим из начальных условий: при $t = 0$, угловая скорость $\omega = 0$. Тогда $c_1 = -\frac{J_p u + J}{b u^2} \ln \left| -\frac{a}{b u} \right|$. Разделив левую и правую части выражения (4.48) на $-\frac{J_p u + J}{b u^2}$, получим:

$$\ln \left| \omega - \frac{a}{b u} \right| = -\frac{b u^2}{J_p u + J} t + \ln \left| -\frac{a}{b u} \right|. \quad (4.49)$$

Или по определению логарифма имеем:

$$e^{-\frac{b u^2}{J_p u + J} t + \ln \left| -\frac{a}{b u} \right|} = \omega - \frac{a}{b u}. \quad (4.50)$$

Откуда получим окончательно:

$$\omega = e^{-\frac{b u^2}{J_p u + J} t + \ln \left| -\frac{a}{b u} \right|} + \frac{a}{b u} = -\frac{a}{b u} e^{-\frac{b u^2}{J_p u + J} t} + \frac{a}{b u}. \quad (4.51)$$

Таким образом, зависимость угловой скорости схвата манипулятора от времени определена. Найдём теперь зависимость $\varphi = \varphi(t)$. Для этого равенство (4.51) запишем в виде:

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{a}{bu} e^{-\frac{bu^2}{J_p u + J} t} + \frac{a}{bu}. \quad (4.52)$$

Решим полученное дифференциальное уравнение методом разделения переменных. В результате получим искомую зависимость:

$$\varphi = \frac{a(J_p u + J)}{b^2 u^3} e^{-\frac{bu^2}{J_p u + J} t} + \frac{a}{bu} t + c_2. \quad (4.53)$$

Постоянную интегрирования c_2 определим из начальных условий: при $t = 0$, φ также равно нулю. После подстановки c_2 окончательно получим:

$$\varphi = \frac{a(J_p u + J)}{b^2 u^3} e^{-\frac{bu^2}{J_p u + J} t} + \frac{a}{bu} t - \frac{a(J_p u + J)}{b^2 u^3}. \quad (4.54)$$

Примерный вид графиков, построенных по зависимостям (4.51) и (4.54), показан на рис. 4.10. Кривая $\omega(t)$ асимптотически приближается к константе $\omega_y = \frac{a}{bu}$, а зависимость $\varphi(t)$ – к прямой $\varphi = \frac{a}{bu} t - \frac{a(J_p u + J)}{b^2 u^3}$.

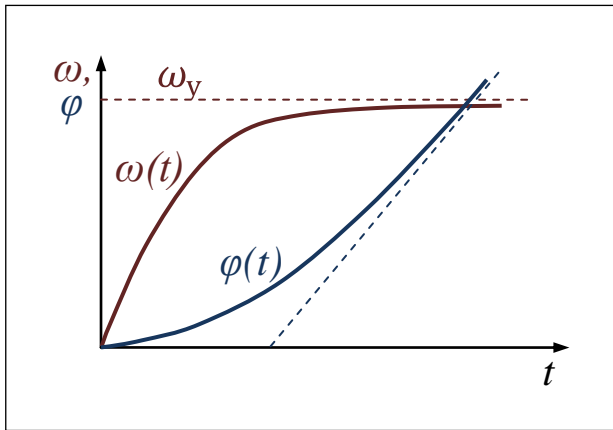


Рис. 4.10 Зависимости $\omega = \omega(t)$, $\varphi = \varphi(t)$

Приведённые выше примеры иллюстрируют упрощённые или идеализированные динамические модели манипуляторов. Реальные источники относительного движения звеньев – электрические, гидравлические и пневматические – вносят свои коррективы в описание динамических моделей. Пожалуй, ближе всего к идеализированной модели – пневмоприводы. При точных динамических расчётах учитывают жёсткость пневмошлангов, реакции, возникающие при сжатии воздуха.

Гидропривод меняет массу звена в зависимости от количества масла в полостях гидроцилиндров. Точный расчёт движения манипулятора с гидроприводом требует применения уравнений движения тела переменной массы.

При использовании электропривода надо учитывать гироскопический эффект вращения роторов двигателей, инерционность электромагнитной системы при изменении M_d .

4.4 Уравновешивание манипуляторов

Манипуляторам последовательной структуры, как любой консольной конструкции, свойственен существенный недостаток – значительные статические моменты от сил тяжести звеньев и объекта, находящегося в схвате. Воспринимающие эти моменты приводы должны обладать значительными моментами противодействия. Разгрузка приводов путём уравновешивания уменьшает мощность двигателей и, как следствие, уменьшает потребление роботом энергии. Уравновешивание выполняется двумя способами:

- посредством установки противовесов;
- с помощью упругих элементов (пружин или сжимаемого воздуха).

Рассмотрим первый способ уравновешивания. На рис. 4.11

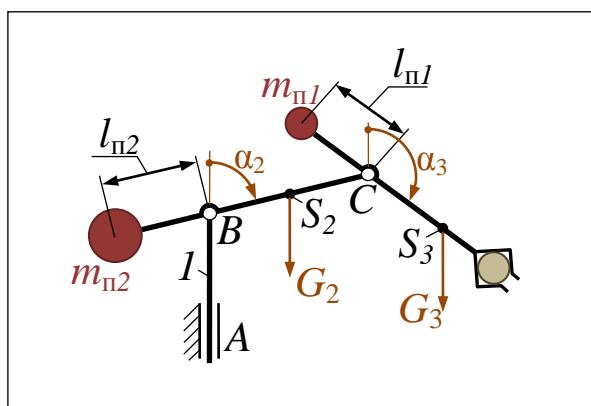


Рис. 4.11 Уравновешивание противовесами

показана схема манипулятора с четырьмя степенями свободы. На схвате с центром масс S_3 установлен противовес массой $m_{п1}$ на расстоянии $l_{п1}$. Запишем равенство статических моментов:

$$m_{п1}l_{п1} = m_3l_{CS_3}, \quad (4.55)$$

где m_3 – суммарная масса звена 3 и объекта, находящегося в схвате.

Из равенства (4.55) определяется либо масса противовеса при известном расстоянии $l_{п1}$, либо расстояние, на которое нужно установить противовес массой $m_{п1}$.

Второе равенство статических моментов имеет вид:

$$m_{п2}l_{п2} = m_2l_{BS_2} + (m_3 + m_{п1})l_{BC}. \quad (4.56)$$

Из этого равенства, задавшись расстоянием $l_{п2}$, определяется масса противовеса $m_{п2}$, либо наоборот.

Таким образом, в результате статического уравнивания общий центр масс звеньев 2, 3 и двух противовесов совпал с неподвижной точкой B . Моменты противодействия, удерживающие звенья в кинематических парах B и C , равны нулю в любом положении манипулятора.

Уравнивание противовесами, как указывалось выше, позволяет снизить мощность двигателей, однако увеличение инерционности манипулятора даёт и обратный эффект – уменьшается быстродействие, снижается точность позиционирования, ухудшаются динамические показатели. Поэтому на практике противовесы в виде массивных грузов на звенья манипуляторов не устанавливают. Их функцию обычно выполняют сами двигатели, которые устанавливают на место противовесов. Но это возможно лишь в манипуляторах с электроприводом. Манипуляторы с гидро- или пневмоприводом чаще уравнивают упругими элементами (пружинами).

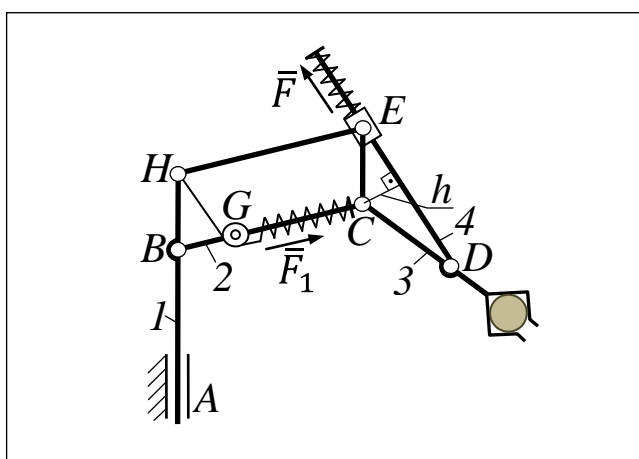


Рис. 4.12 Уравнивание пружинами

Рассмотрим уравнивание с помощью пружин на примере манипулятора, изображённого на рис. 4.11. Звенья 2 и 3 вращаются в вертикальной плоскости. Неуравновешенный момент, создаваемый силой тяжести каждого из этих звеньев пропорционален синусу угла α_i – $m_2 = G_2 l_{BS_2} \sin \alpha_2$; $m_3 =$

$G_3 l_{CS_3} \sin \alpha_3$. Для точного уравнивания необходимо приложить к звеньям создаваемый пружинами обратный момент. На рис. 4.12 показаны примеры уравнивания, когда обратный момент обеспечивается геометрией расположения пружины (звено 2) и введением промежуточного звена – кулисы 4 – (звено 3).

Конструкция приведённых на рис. 4.12 дополнительных механизмов позволяет создавать уравнивающий момент пропорциональный синусу угла поворота звена. При этом так назы-

ваемые базовые вертикали во вращательных кинематических парах B и C были созданы параллелограммом $ВСЕН$, сторона $ВН$ которого является продолжением звена 1 . После создания базовых вертикалей покажем, как уравнивается звено 3 . Момент силы упругости пружины \bar{F} относительно точки C равен:

$$m_C(\bar{F}) = F \cdot h = c \cdot l_{DE} \cdot h = c \cdot 2S_{\Delta CDE} = c \cdot l_{CE} \cdot l_{CD} \cdot \sin \alpha_3,$$

где c – коэффициент жёсткости пружины; $S_{\Delta CDE}$ – площадь треугольника CDE . Угол α_3 показан на рис. 4.11. Подбором жёсткости пружины c обеспечивается равенство $m_C(\bar{F}) = G_3 l_{CS_3} \sin \alpha_3$.

Выражение (4.57) справедливо и для треугольника BGH , поэтому аналогично подбирается жёсткость пружины для уравнивания звена 2 : $m_B(\bar{F}_1) = G_\Sigma l_{BS_2} \sin \alpha_2$, где G_Σ – суммарная сила тяжести группы звеньев, находящихся справа от звена 1 ; l_{BS_2} – расстояние от точки B до центра масс этой группы.

Рассмотрим теперь уравнивание постоянной суммарной силы тяжести манипулятора \bar{G} (рис. 4.12) в кинематической паре A . Установка «подпирающей» пружины не решит проблемы, т.к. усилие упругого элемента будет пропорционально величине его деформации. А для уравнивания необходимо создать *постоянную* подпирающую силу, приложенную к звену 1 и направленную вертикально вверх. Обеспечить постоянное усилие может использование специальных механизмов. На рис. 4.13 представлены примеры двух таких механизмов.

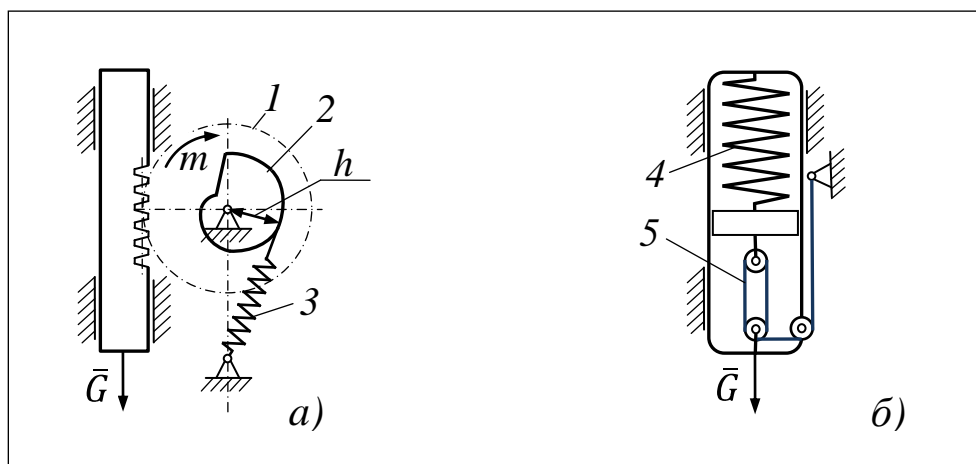


Рис. 4.13 Уравнивающие механизмы

Постоянство момента m , приложенного к зубчатому колесу 1 (рис. 4.13, a), находящемуся на одном валу с кулачком 2 , обеспечивается специальным профилем последнего. Действительно:

$m = c \cdot x \cdot h$, где c – коэффициент жёсткости, а x – величина деформации упругого элемента 3. Профиль кулачка очерчен по спирали Архимеда, благодаря чему с увеличением деформации x уменьшается плечо h .

На рис. 4.13, б пружина 4 с очень большим коэффициентом жёсткости деформируется незначительно, благодаря использованию полиспаста 5. Тем самым обеспечивается приближённое уравновешивание силы \bar{G} .

4.5 Контрольные вопросы

4.1 В чём заключается суть прямой и обратной задач динамики манипуляторов?

4.2 Какова практическая ценность результатов решения обратной задачи динамики манипуляторов?

4.3 Какова последовательность силового расчёта манипуляторов?

4.4 Как вычисляются силы инерции звеньев манипулятора?

4.5 В чём заключаются преимущества матричного способа силового расчёта манипуляторов по сравнению с традиционным?

4.6 Запишите матричную формулу определения главного вектора сил инерции звена манипулятора и раскройте её содержание.

4.7 В чём заключаются преимущества составления уравнений динамики манипуляторов на основе уравнений Лагранжа второго рода?

4.8 Запишите матричную формулу определения кинетической энергии манипулятора и раскройте её содержание.

4.9 Запишите матричную формулу определения потенциальной энергии манипулятора и раскройте её содержание.

4.10 С какой целью выполняют уравновешивание манипуляторов?

4.11 Какими способами уравновешивают манипуляторы?

4.12 В чём заключаются недостатки уравновешивания манипуляторов с помощью противовесов?

5 Точность промышленных роботов

Точность промышленных роботов характеризуется *погрешностью позиционирования*. Как известно, под погрешностью позиционирования (Δ) понимается отклонение центра рабочего органа (захвата) от положения, заданного управляющей программой. Для различных роботов она находится в пределах от 0,005 мм до 2 мм и определяется назначением робота и точностными требованиями конкретной технологической операции.

Точность позиционирования зависит от множества факторов [6]:

- ошибки приводов при отработке заданных значений обобщённых координат;
- ошибки изготовления деталей механизмов манипулятора;
- ошибки, обусловленные податливостью звеньев.

Каждая из этих ошибок может играть основную роль в зависимости от типа робота, его грузоподъёмности и условий функционирования.

5.1 Кинематическая погрешность манипулятора

Под кинематической погрешностью манипулятора понимается точность, обусловленная ошибками отработки приводами программных значений обобщённых координат. Под программными значениями координат понимаются значения обобщённых координат, полученные в результате решения обратной задачи кинематики – задачи о положениях. Эти обобщённые координаты обеспечивают теоретически точный вывод схвата в заданное положение.

При выполнении технологического процесса схват промышленного робота должен занимать вполне определённое положение в пространстве. Однако практически программные значения обобщённых координат воспроизводятся с некоторыми ошибками Δq_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), где n – число обобщённых коор-

динат, и поэтому действительное положение схвата будет отличаться от программного.

Кинематическая погрешность характеризуется двумя параметрами – *линейной* и *угловой* ошибками действительного положения схвата по отношению к программному положению.

Рассмотрим методику вычисления этих ошибок.

5.2 Вычисление линейной и угловой ошибки

На рис. 5.1 представлен манипулятор обобщённой структуры после отработки приводами точных значений обобщённых координат в теоретически точном положении. Со схватом связана подвижная система координат $o_n x_n y_n z_n$. В результате неточной отработки приводами программных значений обобщённых координат q_i , схват и связанная с ним подвижная система координат займет положение $o'_n x'_n y'_n z'_n$.

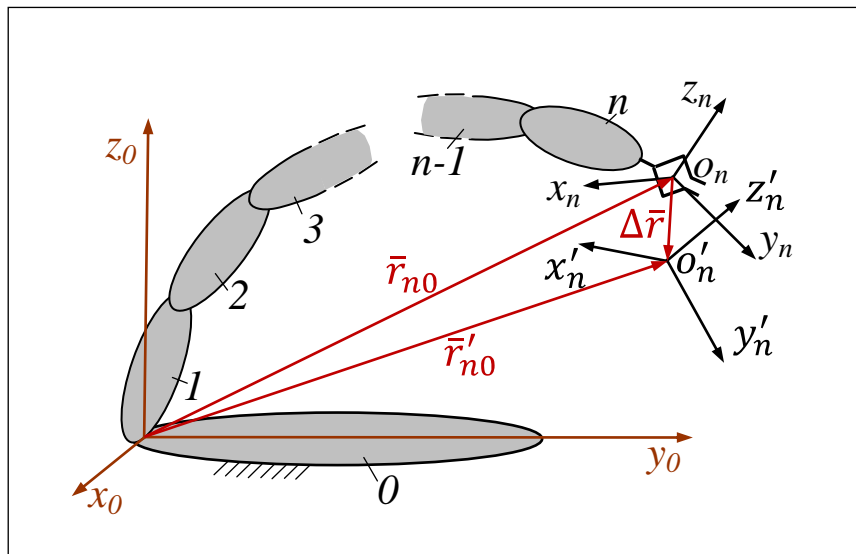


Рис. 5.1 К вычислению линейной и угловой ошибки

Считаем линейную ошибку $\Delta \bar{r}$ малой величиной, тогда её можно найти по формуле дифференциала функции нескольких переменных. Так как \bar{r}_{n0} есть функция обобщённых координат q_i , то можно записать:

$$\Delta \bar{r} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \bar{r}_{n0}}{\partial q_i} \cdot \Delta q_i, \quad (5.1)$$

где Δq_i – ошибка обобщённой координаты q_i .

В матричной форме координаты точки o_n можно записать так:

$$\bar{r}_{n0} = T_{10} \cdot T_{21} \cdot T_{32} \cdot \dots \cdot T_{(n-1)(n-2)} \cdot \bar{r}_n, \quad (5.2)$$

где \bar{r}_n – матрица-столбец координат точки o_n в системе координат $(n-1)$ звена.

Модуль линейной ошибки можно вычислить через элементы столбцовой матрицы \bar{r}_{n0} :

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x_n)^2 + (\Delta y_n)^2 + (\Delta z_n)^2}. \quad (5.3)$$

Отметим, что линейная ошибка является функцией декартовых координат точки позиционирования, поэтому в каждой точке внутри рабочего пространства линейная ошибка будет иметь своё значение.

Определим теперь угловую кинематическую ошибку манипулятора. На основании теоремы Даламбера-Эйлера твёрдое тело, имеющее неподвижную точку, можно перевести из одного положения в любое другое одним поворотом вокруг некоторой оси. За угловую ошибку будем принимать угол, на который нужно повернуть схват, чтобы оси системы $o'_n x'_n y'_n z'_n$ (рис. 5.1) стали параллельны осям системы $o_n x_n y_n z_n$.

Если считать угловую ошибку $\Delta \bar{\psi}$, также как и линейную, малой величиной, то будет иметь место следующее векторное равенство:

$$\Delta \bar{\psi} = \sum_{i=1}^k \Delta q_i \cdot \bar{e}_{i0}, \quad (5.4)$$

где k – число вращательных кинематических пар; \bar{e}_{i0} – орты вращательных кинематических пар в проекциях на оси абсолютной системы координат.

В матричной форме равенство (5.4) будет иметь вид:

$$\Delta \bar{\psi} = \sum_{i=1}^k \Delta q_i \cdot T_{i0}^v \cdot \bar{e}_i, \quad (5.5)$$

где \bar{e}_i – столбцовая матрица проекций орта вращательной кинематической пары на оси системы координат i -го звена.

Отметим, что угловая ошибка, также как и линейная, зависит от координат точки позиционирования.

5.3 Пример определения кинематической погрешности

Определим линейную $\Delta \bar{r}_E$ и угловую $\Delta \bar{\psi}$ ошибки манипулятора с четырьмя степенями свободы, изображённого на рис. 5.2. Известны размеры звеньев: l_{BC} и l_{DE} . Заданы обобщённые координаты φ_{10} , s_{21} , s_{32} , φ_{43} и погрешности их отработки $\Delta \varphi_{10}$, Δs_{21} , Δs_{32} , $\Delta \varphi_{43}$.

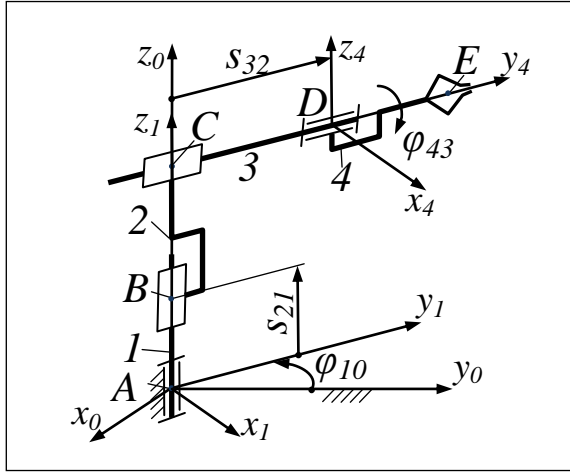


Рис. 5.2 К определению погрешности манипулятора

Линейную ошибку определим по формуле (5.1). Для этого запишем координаты точки E в абсолютной системе координат в виде столбцовой матрицы:

$$\bar{r}_{E0} = \begin{bmatrix} (s_{32} + l_{DE}) \cos \varphi_{10} \\ (s_{32} + l_{DE}) \sin \varphi_{10} \\ s_{21} + l_{BC} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Взяв частные производные \bar{r}_{E0} по обобщённым координатам и умножив их на соответствующие погрешности их отработки, получим (см. формулу (5.1)):

$$\Delta \bar{r}_E = \begin{bmatrix} \Delta x_E \\ \Delta y_E \\ \Delta z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta s_{32} \cos \varphi_{10} - \Delta \varphi_{10} (s_{32} + l_{DE}) \sin \varphi_{10} \\ \Delta s_{32} \sin \varphi_{10} + \Delta \varphi_{10} (s_{32} + l_{DE}) \cos \varphi_{10} \\ \Delta s_{21} \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

Модуль линейной ошибки определим по формуле (5.3):

$$\begin{aligned} \Delta r_E &= \sqrt{\Delta x_E^2 + \Delta y_E^2 + \Delta z_E^2} \\ &= \sqrt{\Delta s_{32}^2 + \Delta \varphi_{10}^2 (s_{32} + l_{DE})^2 + \Delta s_{21}^2} \end{aligned}$$

Таким образом, линейная ошибка определена. Найдём теперь *угловую ошибку* по формуле (5.5). С учётом того, что в манипуляторе две вращательные кинематические пары A и D , запишем:

$$\Delta \bar{\psi} = \Delta \varphi_{10} \cdot T_{10}^v \cdot \bar{e}_1 + \Delta \varphi_{43} \cdot T_{10}^v \cdot T_{41}^v \cdot \bar{e}_4.$$

Раскрыв матрицы преобразования векторов и столбцовые матрицы орт \bar{e}_1 и \bar{e}_4 , получим:

$$\Delta\bar{\psi} = \Delta\varphi_{10} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \\ + \Delta\varphi_{43} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi_{10} & -\sin \varphi_{10} & 0 \\ \sin \varphi_{10} & \cos \varphi_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi_{43} & 0 & \sin \varphi_{43} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{43} & 0 & \cos \varphi_{43} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

После вычислений окончательно получим:

$$\Delta\bar{\psi} = \begin{bmatrix} -\Delta\varphi_{43} \sin \varphi_{10} \\ \Delta\varphi_{43} \cos \varphi_{10} \\ \Delta\varphi_{10} \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Угловая ошибка тоже определена. На этом задачу определения кинематической погрешности манипулятора можно считать решённой.

В заключение следует отметить, что приведённая выше методика расчёта предполагает сочетание максимальных значений погрешностей обработки обобщённых координат. Между тем как эти погрешности являются величинами *случайными*. А, следовательно, и полученный результат расчёта линейной и угловой ошибки будет тоже случайной и маловероятной величиной. Тем не менее, для ответственных операций загрузки – разгрузки станков, сборочных операций этот метод можно рекомендовать. В теории взаимозаменяемости этот метод расчёта получил название «метод максимума-минимума». В остальных случаях используется вероятностный метод расчёта погрешностей.

5.4 Контрольные вопросы

5.1 Какие факторы влияют на точность позиционирования манипулятора?

5.2 Чем характеризуется кинематическая погрешность манипулятора?

5.3 Что такое линейная и угловая ошибки?

5.4 Как рассчитать линейную ошибку?

5.5 Как рассчитать угловую ошибку?

6 Принципы работы манипулятора

Алгоритмы управления роботами предполагают использование *управляемого* изменения обобщённых координат. При этом системы управления выдают команды на обработку этих координат в виде: напряжения на обмотки управления, потенциала, последовательности импульсов, цифрового кода и т.п. Мощность управляющих сигналов, как правило, мала. Затем двигатели обрабатывают заданное значение обобщённых координат. В этих условиях самое широкое распространение в робототехнике для реализации движений получили сервомеханизмы.

6.1 Сервомеханизмы

Сервомеханизм – это система автоматического управления, в которой входной управляющий сигнал преобразуется в механическое линейное или угловое перемещение управляемого объекта.

Для сервомеханизмов промышленных роботов объектом управления является положение звеньев манипулятора. Значительно реже к числу объектов управления относят: скорость перемещений, усилие в схвате.

Сервомеханизмы в приводах манипуляторов реализуют автоматическое управление, в результате которого манипулятор совершает перемещение в точно заданное положение. Причём мощность выходного сигнала, под действием которого происходит движение, во много раз превышает мощность входного управляющего воздействия. Для того чтобы добиться усиления входного сигнала, необходимо извне подводить дополнительную энергию (рис. 6.1).

На практике в качестве исполнительных устройств сервомеханизмов используют электродвигатели (постоянного тока, переменного тока, шаговые), гидроцилиндры и пневмоцилиндры (линейные, поворотные).

- Все системы управления можно разделить на два класса:
- с открытым контуром управления (разомкнутые);
 - с замкнутым контуром управления (с обратной связью).

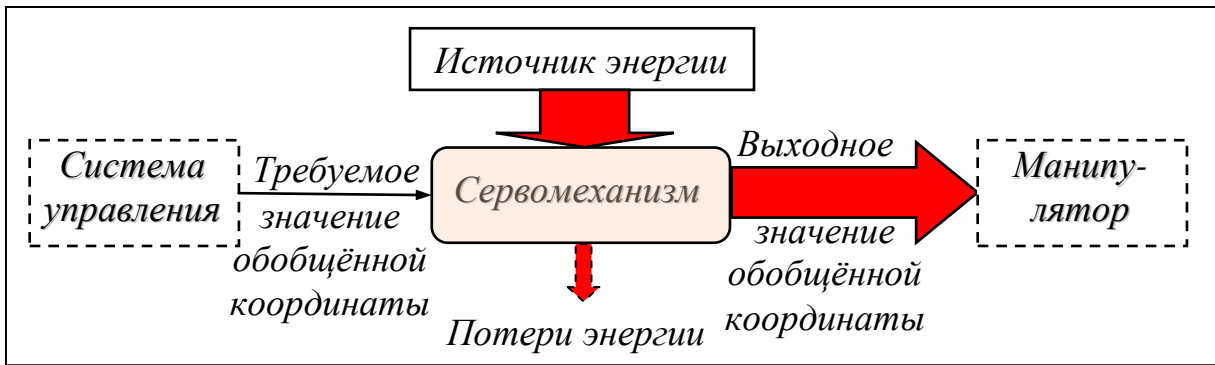


Рис. 6.1 Потоки энергии в сервомеханизме

Разомкнутая система управления (рис. 6.2, а) проще в реализации, и поэтому дешевле. Замкнутая система управления (рис. 6.2, б) более сложная и дорогая. Однако обладает более высокой точностью, скоростью реакции на управляющее воздействие и имеет большую устойчивость к шумам и помехам.

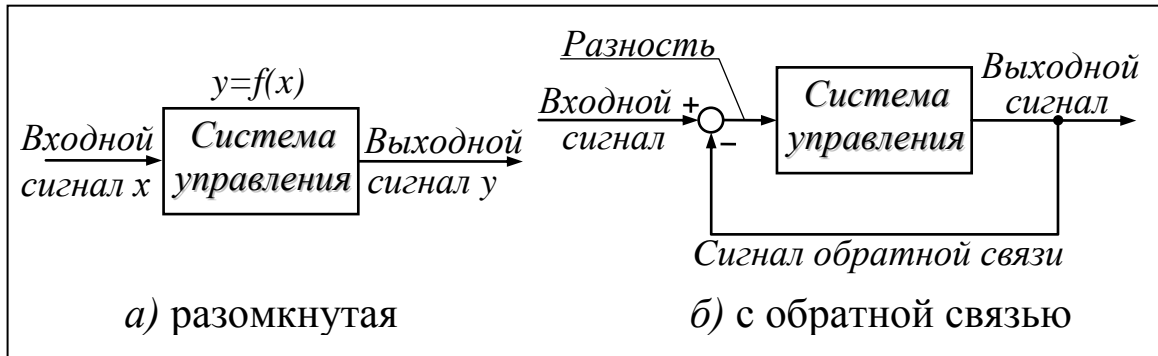


Рис. 6.2 Системы управления роботами

Сервомеханизмы промышленных роботов являются типичными представителями замкнутых систем автоматического управления.

По типу исполнительных устройств сервомеханизмы, используемые в робототехнике, подразделяются на электрические, электрогидравлические и пневматические. Ниже в таблице представлены сравнительные характеристики этих сервомеханизмов.

Тип сервомеханизма	Конструкция	Стоимость	Мощность	Точность
Электрический	простая	малая	высокая	высокая
Электрогидравлич.	сложная	высокая	высокая	высокая
Пневматический	сложная	сравнительно высокая	невысокая	низкая

Необходимо также отметить, что электрогидравлические сервомеханизмы могут загрязнять окружающую среду. Электрические сервомеханизмы – самые надёжные, они идеально согласуются с электронными системами управления и поэтому являются наиболее перспективными.

В зависимости от того, в аналоговой или в цифровой форме осуществляется обработка поступающей информации, различают два типа сервомеханизмов: *аналоговые* и *цифровые*.

6.2 Электрические сервомеханизмы

В последние годы всё большее применение в робототехнике получили электрические сервомеханизмы. Их основные преимущества описаны выше. К ним следует добавить компактную конструкцию двигателей и преобразователей, высокое быстродействие, высокий крутящий момент, низкий уровень шума и вибраций, а также доступность электрической энергии. В качестве двигателей в этих сервомеханизмах используются:

- высокомоментные двигатели постоянного тока;
- бесколлекторные двигатели постоянного тока (вентильные);
- асинхронные двигатели переменного тока;
- шаговые двигатели¹⁶;
- двигатели прямого действия.

В самых распространённых в робототехнике сервомеханизмах применяются *высокомоментные двигатели постоянного тока*. Так как именно эти двигатели обладают хорошей управляемостью и позволяют легко добиться высокой точности работы сервосистемы. Высокомоментными называют двигатели постоянного тока (рис. 6.3) с возбуждением от постоянных магнитов I , которые располагаются на статоре. В отличие от двигателей с электромагнитным возбуждением, когда магнитное поле статора образуется с помощью электрических обмоток, уложенных в пазы статора, высокомоментные двигатели обладают меньшими радиальными габаритами статора. За счёт этого удаётся увеличить диаметр ротора, а, следовательно, и движущий момент на нём.

¹⁶ – эти двигатели используются только в разомкнутых системах автоматического управления.

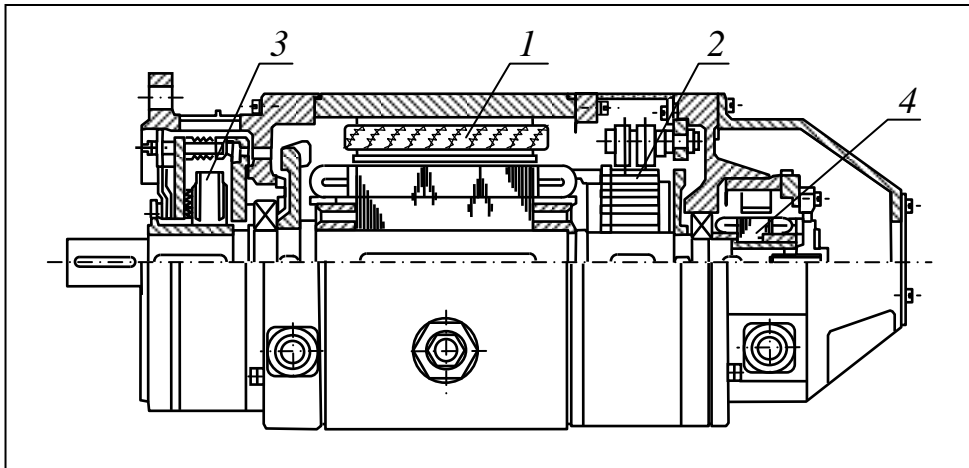


Рис. 6.3 Высокомоментный двигатель постоянного тока

Для подачи управляющего напряжения на обмотки ротора, на последнем (рис. 6.3) расположен коллекторно-щёточный механизм 2. С целью мгновенной остановки двигателя в заданном положении в одном корпусе с ним выполнен электромагнитный тормоз 3. В этот же корпус смонтирован тахогенератор 4, выдающий малой величины напряжение, пропорциональное скорости ротора. О его назначении см. ниже.

Функциональная схема аналогового сервомеханизма на основе высокомоментного двигателя постоянного тока представлена на рис. 6.4.

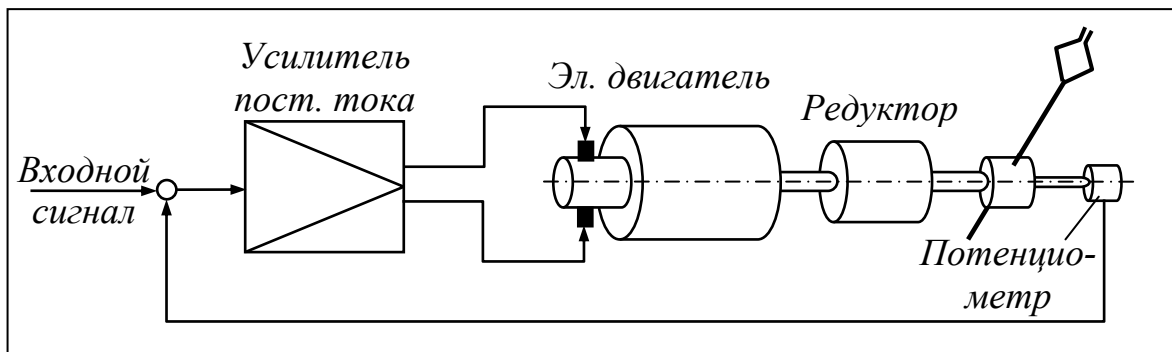


Рис. 6.4 Аналоговый сервомеханизм с двигателем постоянного тока

В последних моделях промышленных роботов стали применяться цифровые сервомеханизмы (рис. 6.5). Входной сигнал в цифровом коде подаётся на счётчик, где он сравнивается с цифровым кодом, поступающим с цифрового потенциометра 4. Его ещё называют поворотным кодирующим

устройством или кодовым датчиком¹⁷. После вычисления счётчиком разности поступивших кодов, она подаётся в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Далее аналоговый сигнал

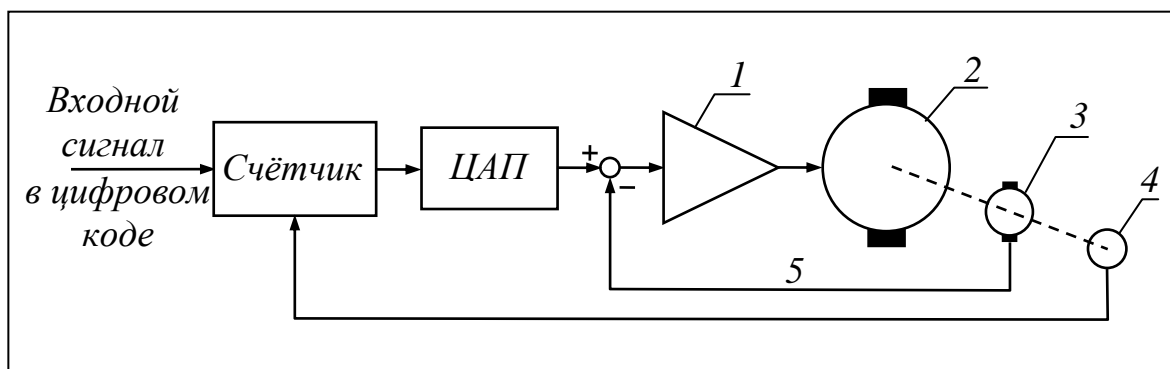


Рис. 6.5 Цифровой сервомеханизм с двигателем постоянного тока

сравнивается с напряжением тахогенератора 3 и их разность, усиленная в усилителе постоянного тока 1, подаётся на двигатель 2. Назначение тахогенератора – обеспечить в системе управления обратную связь по скорости 5. Это позволяет добиться плавного приближения манипулятора к заданной позиции. На рис. 6.6 показана зависимость скорости звена манипулятора от времени в системе с жёстким управлением (без тахогенератора) – 1, и та же зависимость в системе с мягким управлением (с двойной обратной связью) – 2.

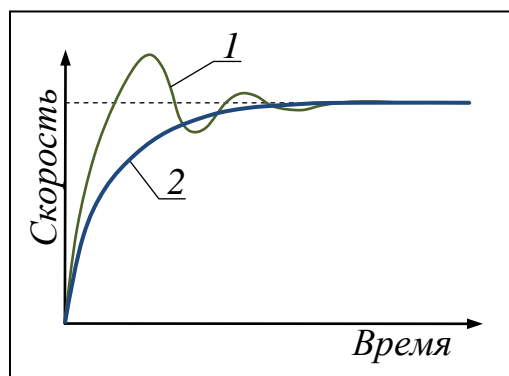


Рис. 6.6 Зависимости скорости звена манипулятора от времени

Использование в сервомеханизме двигателя постоянного тока возможно только совместно с полупроводниковым тиристорным преобразователем. Последний выполняет двойную функцию – преобразует переменный ток в постоянный и, одновременно, управляет скоростью вращения ротора двигателя. Рассмотрим принцип действия тиристорного преобразователя.

Как известно, тиристор – это трёхэлектродный управляемый диод (рис. 6.7, а), который пропускает ток только в прямом направлении при условии, что на управляющий электрод подан им-

¹⁷ – принцип действия кодового датчика рассмотрен в главе 7.

пульс управляющего напряжения u_y , открывающего тиристор. При этом время срабатывания тиристора очень мало, оно составляет примерно (15...20) микросекунд.

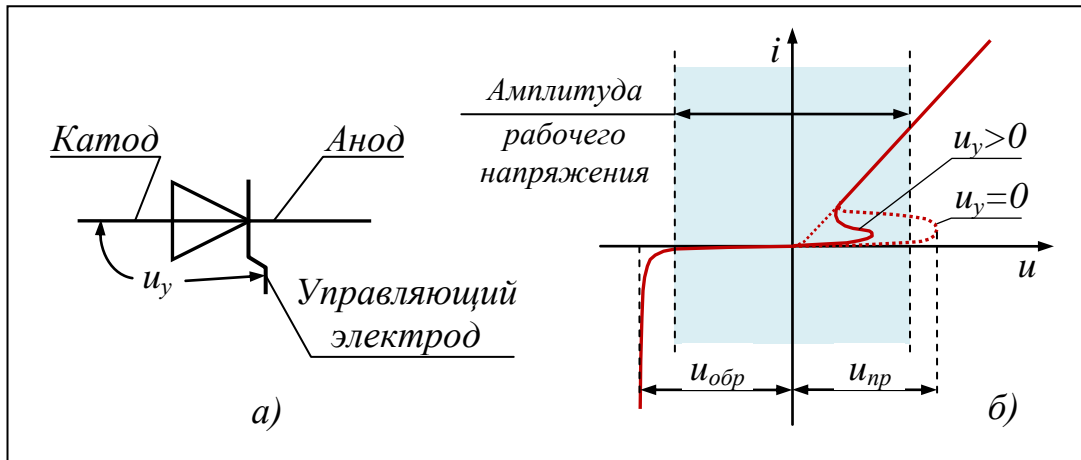


Рис. 6.7 Тиристор и его вольтамперная характеристика

На вольтамперной характеристике тиристора показано напряжение прямого $u_{пр}$ и обратного $u_{обр}$ пробоя, а также амплитуда рабочего напряжения. Из графика видно, что при отсутствии управляющего импульса ток через тиристор не протекает как в прямом, так и в обратном направлениях. При подаче управляющего импульса ($u_y > 0$) тиристор открывается и пропускает ток в прямом направлении.

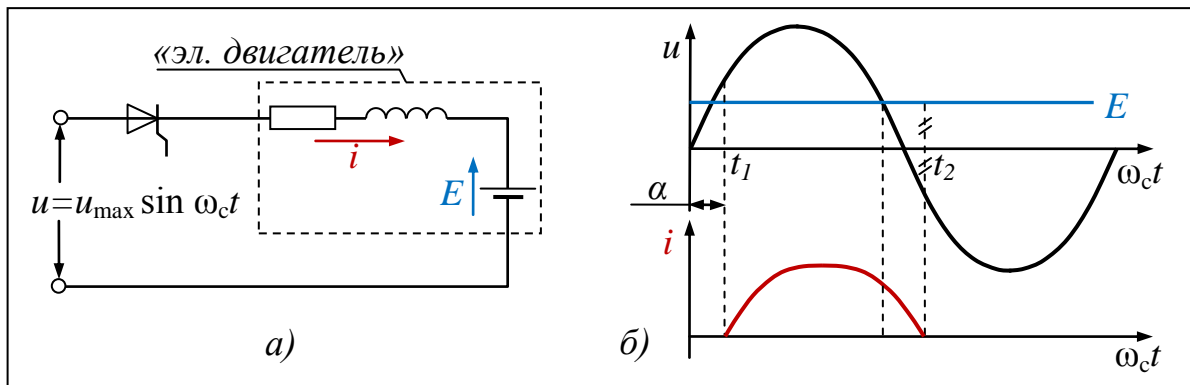


Рис. 6.8 Эквивалентная цепь и характеристики однополупериодного тиристорного преобразователя

На рис. 6.8, а показана эквивалентная цепь однополупериодного тиристорного преобразователя. Продолжительность протекания тока через одну обмотку эквивалентного двигателя зависит от фазы α (рис. 6.8, б) подачи на тиристор управляющего импульса и от величины эдс электромагнитной индукции. В момент времени t_1 тиристор открывается, а в момент t_2 – закрывается. Та-

ким образом, меняя угол открытия тиристора α , можно управлять величиной тока, проходящего через двигатель. Число используемых в преобразователе тиристоров определяется числом обмоток двигателя и возможностью его реверсирования, а также числом фаз переменного тока (рис. 6.9).

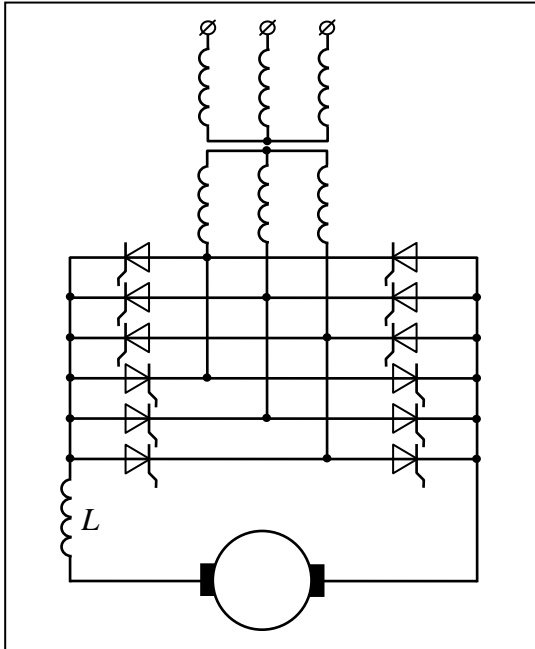


Рис. 6.9 Тиристорный преобразователь с двигателем постоянного тока

включена индуктивность L (инерционный элемент) для ограничения скорости нарастания тока и сглаживания его пульсаций.

Приведём некоторые технические характеристики выпускаемых в Российской Федерации высокомоментных двигателей постоянного тока, используемых в робототехнике:

- мощность: 0,04 ... 1,1 кВт;
- номинальная частота вращения: 3000, 1000, 750 об/мин;
- номинальный момент: 0,1 ... 14 Нм.

Рассмотренный сервомеханизм с двигателем постоянного тока имеет существенный недостаток – сравнительно низкую надёжность из-за наличия щёточно-коллекторного устройства. Угольные щётки этого устройства скользят по ламелям коллектора, происходит их механический и электроэрозионный износ, а, в связи с этим, возникает необходимость профилактических осмотров и их своевременной замены.

Управляющее напряжение на тиристоры подаётся от блока импульсно-фазового управления. Этот блок служит для формирования управляющих импульсов прямоугольной формы, распределения их по тиристорам и регулирования их фазы. Фаза чередования импульсов зависит от величины управляющего напряжения. Чем больше напряжение, тем раньше вырабатывается импульс. Приведённая на рис. 6.9 схема электропривода с тиристорным управлением является реверсивной. В цепь ротора двигателя

Этого недостатка лишены *бесколлекторные двигатели* постоянного тока, или иначе *вентильные* двигатели. Они представляют собой синхронную машину (рис. 6.10), в которой вращение

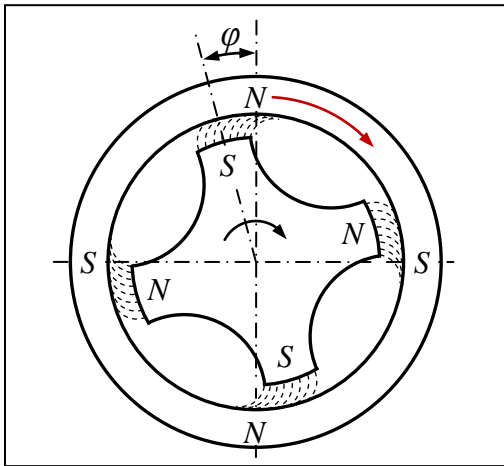


Рис. 6.10 Принципиальная схема синхронного двигателя

магнитного поля статора осуществляется коммутацией его обмоток с помощью тиристорного коммутатора, управляемого сигналами датчика положения ротора. Ротор вращается с частотой магнитного поля статора. Магнитное поле ротора создаётся расположенными на нём постоянными магнитами.

В сервомеханизмах роботов требуется быстрое изменение режимов работы, включая и быстрый реверс. В то же время, необходимо плавно менять частоту вращения магнитного поля, чтобы двигатель не выходил из синхронизма. Это достаточно сложно, особенно в тех случаях, когда начальная частота – доли Герц, а затем возрастает до максимального значения. В этом случае применяется метод частотного регулирования с самосинхронизацией. Он подразумевает управление тиристорным преобразователем частоты от системы датчиков положения ротора.

На рис. 6.11 изображён вентильный двигатель в продольном *а)* и поперечном *б)* разрезах. В корпусе *1* уложен пакет статора *2*, в пазах которого расположена обмотка *3*. На цилиндрической

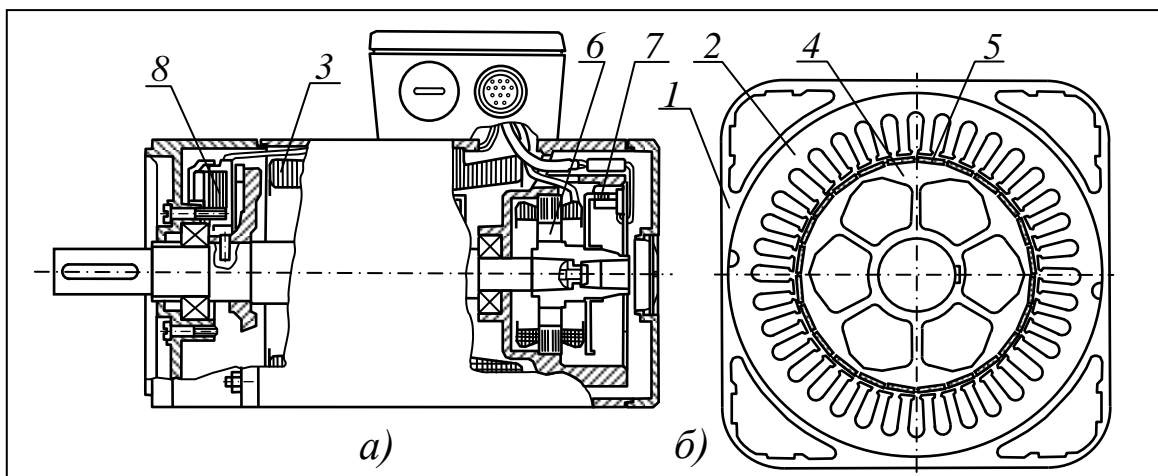


Рис. 6.11 Вентильный двигатель

части пакета ротора 4 расположены постоянные магниты 5. Для обеспечения обратной связи по скорости и по положению в одном корпусе с двигателем находятся тахогенератор 6 и датчик положения ротора 7. В этом же корпусе смонтирован электромагнитный тормоз 8. Тиристорный коммутатор подключается к обмоткам статора, как показано на рис. 6.12. Преобразователь *Пр1* формирует положительный полупериод выходного тока, а *Пр2* – отрицательный полупериод фазы *A*. Аналогично работают мосты *Пр3* и *Пр4*, *Пр5* и *Пр6*, питающие фазы *B* и *C* соответ-

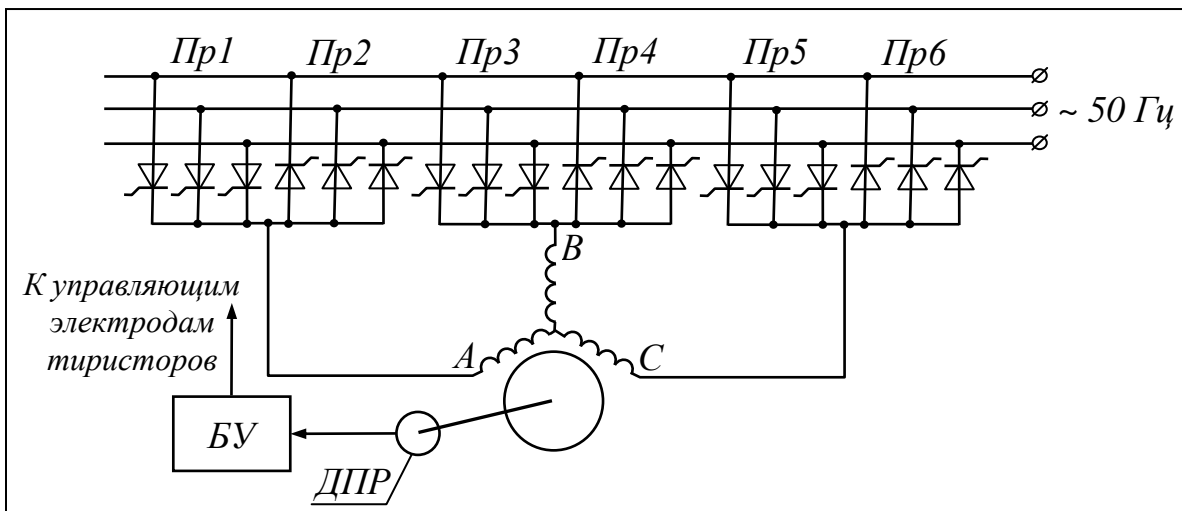


Рис. 6.12 Вентильный двигатель с тиристорным преобразователем частоты

венно. Блок управления (БУ) формирует управляющие импульсы и распределяет их по тиристорам точно также как и в приводах с двигателем постоянного тока, с той лишь разницей, что их фаза корректируется датчиком положения ротора (ДПР).

Благодаря такой конструкции сервомеханизм с вентильным двигателем имеет более высокую надёжность, больший диапазон регулирования, лучшие массогабаритные показатели и более высокий к.п.д., чем сервомеханизм с двигателем постоянного тока. А отсутствие щёточно-коллекторного механизма делает такой привод менее шумным. Его основные технические характеристики таковы: номинальный момент – 13...35 Нм; максимальная частота вращения ротора – 1500 об/мин; диапазон регулирования скорости – 1...10000; время пуска на максимальную скорость – 0,1 с (!).

Самым простым по конструкции электродвигателем на сегодняшний день является *асинхронный двигатель переменного тока*. Он представляет собой пакет статора с уложенными в его пазы обмотками и вращающийся короткозамкнутый ротор типа «беличье колесо». Трёхфазный переменный ток подаётся на соответствующие обмотки статора и порождает вращающееся магнитное поле. Взаимодействие этого поля с полем электромагнитной индукции в роторе создаёт вращающий момент. Ротор вращается с частотой:

$$n = n_0(1 - s), \quad (6.1)$$

где n_0 – частота вращения магнитного поля в статоре, s – скольжение ($s = 0,03 \dots 0,05$).

Частота вращения магнитного поля определяется формулой:

$$n_0 = 60f_c/p, \quad (6.2)$$

где f_c – частота питающего напряжения, Гц; p – число пар полюсов обмотки статора.

Из формул (6.1) и (6.2) видно, что эффективно управлять частотой вращения ротора можно только изменением частоты питающего напряжения. С развитием полупроводниковой преобразовательной техники появилась возможность создания преобразователей частоты и регулируемого электропривода с асинхронными двигателями переменного тока с очень высокими технико-экономическими показателями. Они используются в про-

мышленных роботах грузоподъёмностью свыше 40 кг.

Законы управления двигателем переменного тока значительно сложнее, чем двигателя постоянного тока. Для того чтобы уменьшить влияние скольжения s на частоту вращения ротора, необходимо менять не только частоту питающего напряжения, но и его напряжение. Эту двойную функцию выполняет преобразователь (рис. 6.13), содержащий *управляемый выпрямитель* на основе тиристоров и *инвертор*.

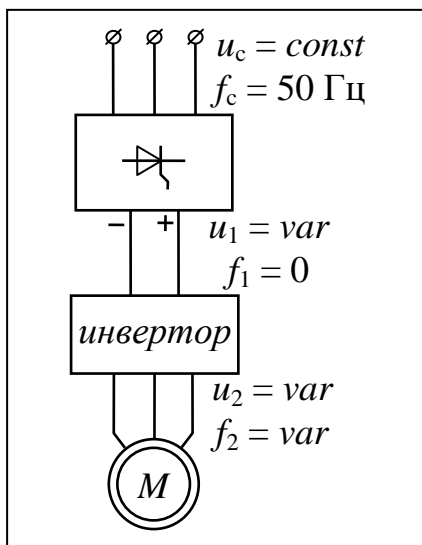


Рис. 6.13 Функциональная схема преобразователя

Управляемый выпрямитель работает точно так же, как и тиристорный преобразователь сервомеханизма с двигателем постоянного тока (рис. 6.9). На его выходе получают постоянный ток напряжением, пропорциональным управляющему сигналу. Инвертор представляет собой набор электронных ключей-

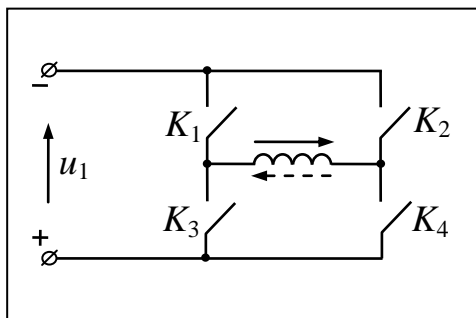


Рис. 6.14 Функциональная схема инвертора

переключателей, коммутирующих обмотки асинхронного двигателя. На рис. 6.14 представлена схема питания одной из трёх его обмоток. Переменный ток получается попарным замыканием электронных ключей K_1, K_4 и K_2, K_3 . Частота переключений определяет частоту получаемого переменного напряжения.

Приведём некоторые технические характеристики серийно выпускаемых комплектов с асинхронными двигателями: мощность – 0,09...18 кВт; номинальные моменты – 7...70 Нм; диапазон регулирования скорости – 1...10000.

В отличие от сервомеханизмов с асинхронными двигателями *шаговые двигатели* применяются в роботах малой грузоподъёмности. Повышенные требования к точности привели к их вытеснению двигателями постоянного тока и вентильными двигателями. Тем не менее, они продолжают широко использоваться в моделях учебных роботов и роботах малой грузоподъёмности. Принцип действия шагового двигателя основан на дискретном изменении магнитного поля в зазоре машины. В статоре 1 (рис. 6.15, а) уложены обмотки 2. Вращающийся ротор 3 представляет

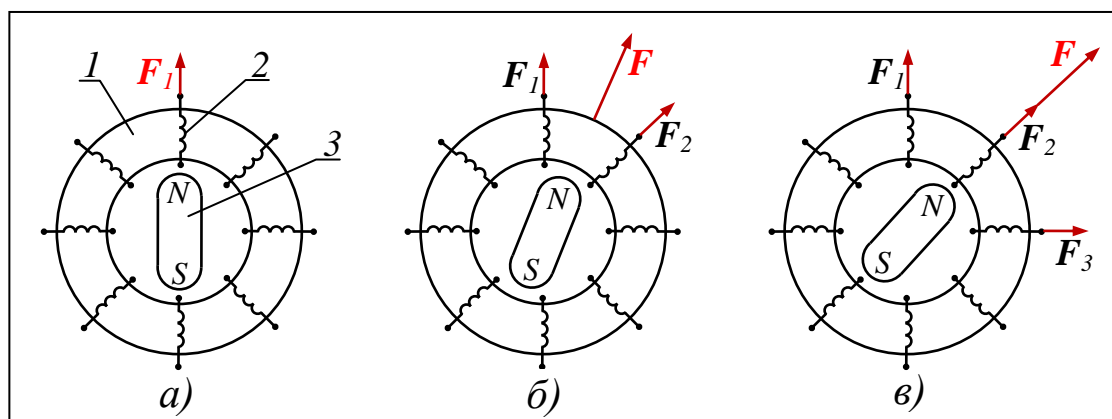


Рис. 6.15 Схемы работы шагового двигателя

собой постоянный магнит. При периодических переключениях обмоток статора его электродвижущая сила F поворачивается на определённый угол – шаг, вызывая поворот ротора на тот же шаг. На рис. 6.15 б, в показано, как можно увеличить электродвижущую силу распределяя управляющие импульсы по соседним обмоткам статора.

Таким образом, применение шаговых двигателей позволяет преобразовывать управляющие импульсы в угол поворота ротора без датчика обратной связи. При этом угол поворота ротора пропорционален числу управляющих импульсов. Характеристики отечественных шаговых двигателей в зависимости от типоразмера и исполнения: напряжение в импульсе – 12...27 В; угловой шаг – $1^\circ \dots 22,5^\circ$; максимальная частота следования импульсов – 100...2500 Гц; потребляемая мощность – 2...300 Вт.

Все рассмотренные выше двигатели быстро реагируют на сигналы управления, обладают малой массой и габаритами. Но они развивают малый момент при высокой скорости, поэтому в кинематическую цепь включают редукторы. Их использование значительно увеличивает инерционность системы и, следовательно, снижают её быстродействие. Этого недостатка лишены *двигатели «прямого действия»*. Они развивают большой момент при малой скорости за счёт электромагнитного редуцирования скорости, что исключает необходимость использования редуктора.

Статор и ротор двигателя «прямого действия» имеют цилиндрическую форму с равномерно расположенными зубцами (рис. 6.16) и вмонтированы непосредственно в элементы вращательной кинематической пары манипулятора. Число зубцов ротора z_p больше числа зубцов статора z_c . Между зубцами статора уложены обмотки, а зубцы ротора представляют собой мощные постоянные магниты. Вращающееся магнитное поле статора создаётся точно так же, как и в вентильных двигателях – тиристорным коммута-

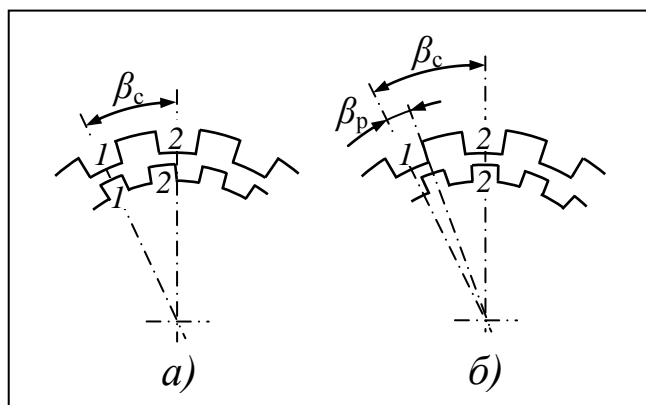


Рис. 6.16 Схема работы двигателя «прямого действия»

ра z_p больше числа зубцов статора z_c . Между зубцами статора уложены обмотки, а зубцы ротора представляют собой мощные постоянные магниты. Вращающееся магнитное поле статора создаётся точно так же, как и в вентильных двигателях – тиристорным коммута-

тором. В момент времени t_1 (рис. 6.16, *a*) оси зубцов 1 статора и ротора совпадают, что соответствует максимуму магнитной проводимости. В момент времени t_2 (рис. 6.16, *б*) ось максимальной проводимости повернулась на угловой шаг статора β_c , а ротор повернулся лишь на угол β_p . При этом совпадут оси зубцов 2 статора и ротора. Произошло редуцирование, передаточное отношение которого:

$$u = \frac{\beta_c}{\beta_p}. \quad (6.3)$$

Учитывая, что $\beta_c = 2\pi/z_c$ и $\beta_p = 2\pi/z_c - 2\pi/z_p$, получим:

$$u = \frac{2\pi/z_c}{2\pi/z_c - 2\pi/z_p} = \frac{z_p}{z_p - z_c}. \quad (6.4)$$

Так как разность чисел зубцов ротора и статора мала ($z_p - z_c = 1 \dots 3$), то передаточное отношение может достигать нескольких десятков.

6.3 Электрогидравлические сервомеханизмы

Электрогидравлические сервомеханизмы используются в промышленных роботах большой (50...100 кг) и сверхбольшой (более 100 кг) грузоподъёмности. Особенностью таких роботов является наличие не только значительной полезной нагрузки, но и преобладание в ней инерционных нагрузок от подвижных звеньев робота. Именно для таких роботов больше проявляются преимущества гидроприводов в энергетических характеристиках, за счёт которых обеспечивается значительное снижение массы робота. Достаточно отметить, что отношение грузоподъёмности к собственной массе у современных промышленных роботов сверхбольшой грузоподъёмности равно 0,3...0,5. С уменьшением грузоподъёмности это отношение уменьшается до 0,03.

К преимуществам гидроприводов, за счёт которых достигается такое соотношение, следует отнести: большой коэффициент усиления по мощности (более 1000); отсутствие дополнительных кинематических цепей, из-за несжимаемости жидкости, высокая стабильность скорости звена, высокое быстродействие и точность позиционирования.

Как правило, промышленные роботы с гидроприводом имеют универсальное применение. В таких роботах манипулятор имеет шесть степеней свободы, точность его позиционирования – до $\pm 0,5$ мм, объём рабочего пространства – более 30 м^2 . В настоящее время около 30% мирового парка промышленных роботов имеют электрогидравлический привод.

В качестве двигателей в электрогидравлических сервомеханизмах используются линейные (рис. 6.17, а) и поворотные (рис. 6.17, б) гидроцилиндры.

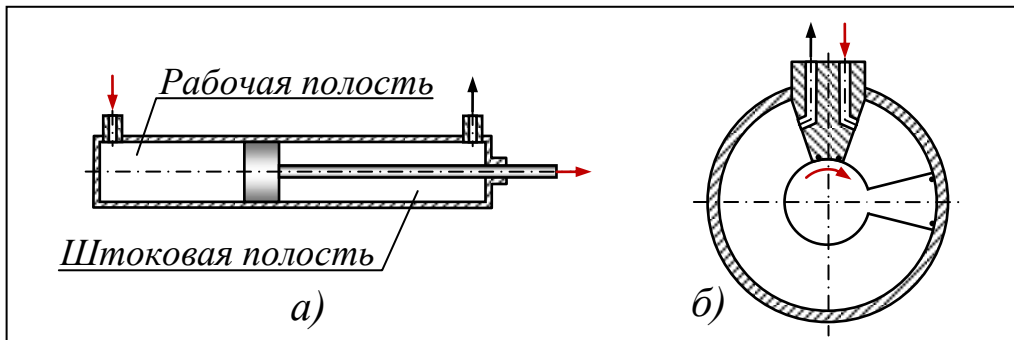


Рис. 6.17 Гидроцилиндры

Изложение основных принципов управления электрогидравлическими сервомеханизмами станет более ясным, если предположить, что система состоит из двух расположенных одна над другой подсистем. Первая из них образована парой гидроцилиндр-золотник, где золотник применяется для изменения скорости и направления движения штока гидроцилиндра. Вторая подсистема представляет собой устройство «сопло-заслонка».

Подсистема гидроцилиндр-золотник (рис. 6.18) позволяет с помощью очень незначительного усилия F на штоке золотника 1 заставить перемещаться тяжёлый груз 2. При этом скорость перемещения груза будет пропорциональна площади проходного сечения кольцевых щелей золотника 3, через которые под давле-

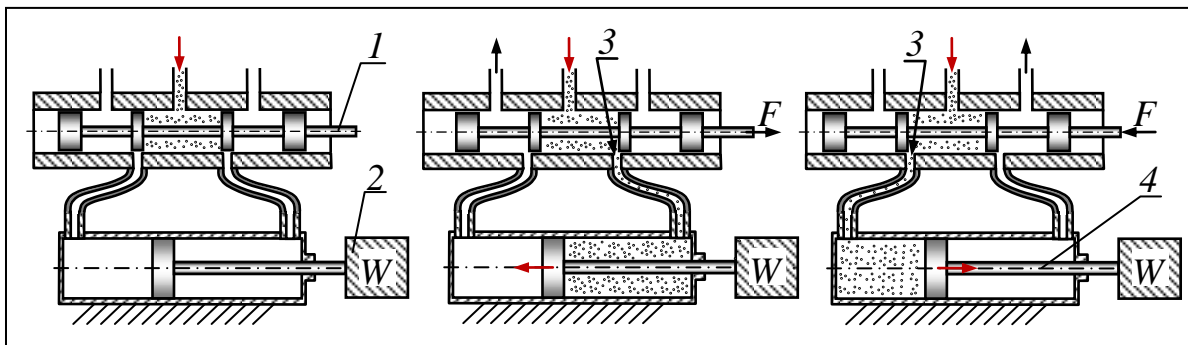


Рис. 6.18 Схема работы подсистемы гидроцилиндр-золотник

нием проходит рабочая жидкость – масло. Заметим, что если требуется остановка штока гидроцилиндра 4 в желаемой точке, то с помощью описанного устройства это невозможно. Поэтому во всех электрогидравлических сервосистемах применяется устройство «сопло-заслонка». Оно обеспечивает погрешность перемещения штока золотника не более 0,005 мм.

Принцип действия устройства «сопло-заслонка» понятен из рис. 6.19, а. Осуществляя небольшие перемещения x заслонки 1 относительно сопла 2, можно с большой точностью управлять давлением масла p_c перед соплом. На рис. 6.19, б приведена зависимость этого давления от величины зазора x . Из графика видно, что с увеличением зазора с 0,1 до 0,3 мм давление перед соплом уменьшается в четыре раза. Причём зависимость на этом интервале практически линейная.

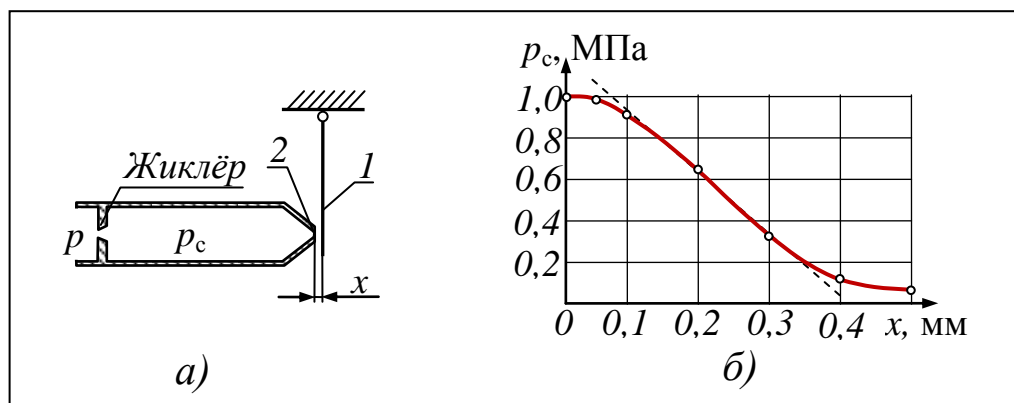


Рис. 6.19 Устройство «сопло-заслонка»

На рис. 6.20 показаны примеры использования устройства «сопло-заслонка» для управления перемещением штока золотника 1 по асимметричной а) и симметричной б) схемам.

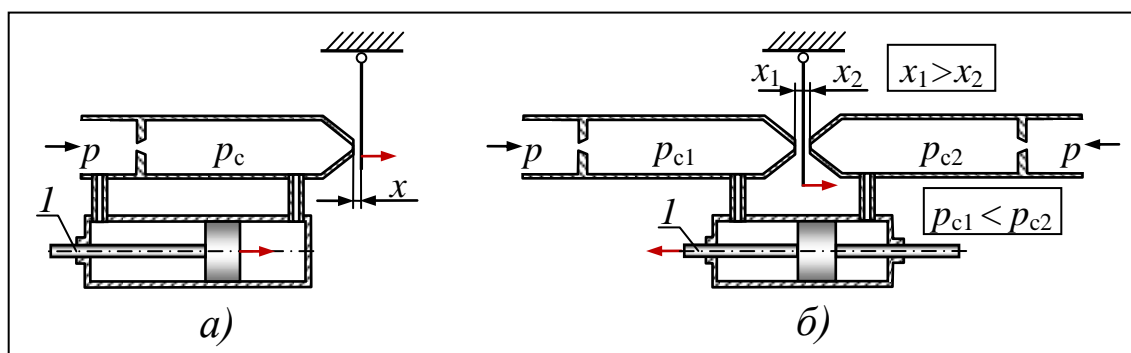


Рис. 6.20 Примеры использования устройства «сопло-заслонка»

Симметричная схема более предпочтительна, так как она обладает большей чувствительностью и устойчивостью.

Для управления заслонкой 1 (рис. 6.21) электрогидравлического сервомеханизма применяется электромеханический преобразователь 2, представляющий электромагнитную систему с поворотным якорем 3. Заслонка и якорь, представляющие собой единое целое, шарнирно соединены со штоком золотника 4,

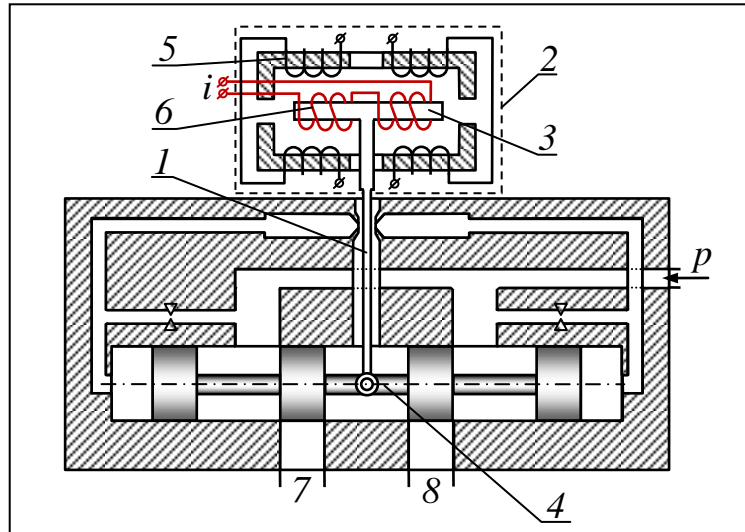


Рис. 6.21 Схема электрогидравлической подсистемы «сопло-заслонка»

обеспечивая тем самым обратную связь. Взаимодействие магнитных потоков обмоток подмагничивания 5 и управления 6 создаёт момент и угол поворота якоря с заслонкой, пропорциональные току управления i . Выходные магистрали 7 и 8 золотникового устройства подсоединяются к рабочей и штоковой полости гидроцилиндра соответственно.

Кроме описанных устройств электрогидравлический механизм содержит электронный усилитель 1 (рис. 6.22) с суммирующим устройством, в котором сравниваются сигналы управле-

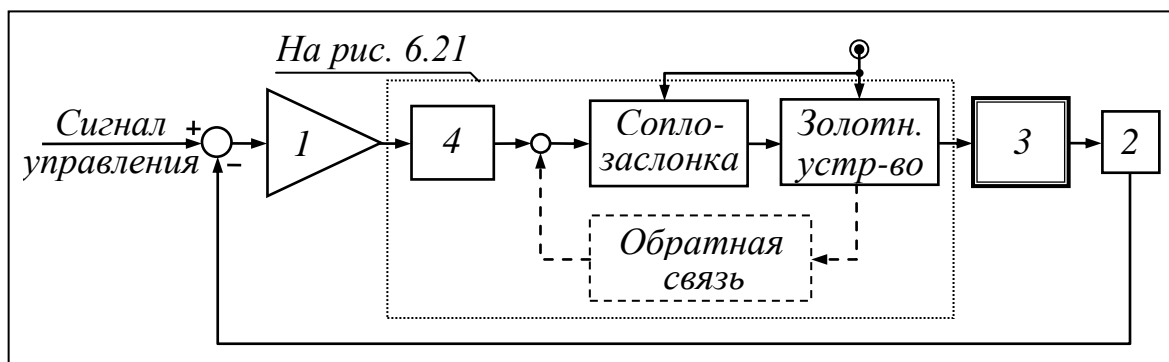


Рис. 6.22 Функциональная схема электрогидравлического сервомеханизма

ния с сигналом обратной связи по положению, поступающему от потенциометра 2, и определяется разность этих сигналов в виде тока рассогласования. Движок потенциометра приводится в действие штоком рабочего гидроцилиндра 3. В усилителе ток рассогласования усиливается до тока управления, который затем поступает в обмотки управления электромеханического преобразователя 4.

Таким образом, двойная обратная связь, как в электрических сервомеханизмах, обеспечивает плавность работы в переходных режимах и отсутствие колебаний. Однако необходимо отметить и недостатки, присущие электрогидравлическим сервосистемам. Это, прежде всего, не только высокая стоимость элементов гидропривода, но и дороговизна рабочего масла, которое необходимо периодически менять из-за ограниченного ресурса его работы. Кроме этого, насосные станции, устанавливаемые на мобильные роботы, значительно их утяжеляют. Указанных недостатков лишены пневматические сервомеханизмы.

6.4 Пневматические сервомеханизмы

Основной причиной, сдерживающей широкое использование пневматических сервомеханизмов в робототехнике, является невысокая точность позиционирования и малая выходная мощность, обусловленная сжимаемостью воздуха. Если бы удалось каким-то образом повысить точность управления позицией и управлять скоростью движения, то лучших приводов для промышленных роботов трудно было бы желать. Ведь эти приводы обладают абсолютной экологичностью, просты в обслуживании, обеспечивают плавность перемещений, благодаря сжимаемости воздуха.

Необходимо отметить, что пневматические приводы (не сервомеханизмы) нашли самое широкое применение в простых дешёвых роботах с цикловыми системами управления, где не предъявляются высокие требования к точности позиционирования. Пневмоприводы с цикловым управлением обеспечивают управление звена по двум крайним точкам, где устанавливаются пружинные или пневматические демпферы. Примером таких систем может служить пневмосистема промышленного робота МП-9С,

схема которой представлена на рис. 6.23. Робот имеет три степени свободы, кинематическая схема манипулятора этого робота изображена на рис. 4.2.

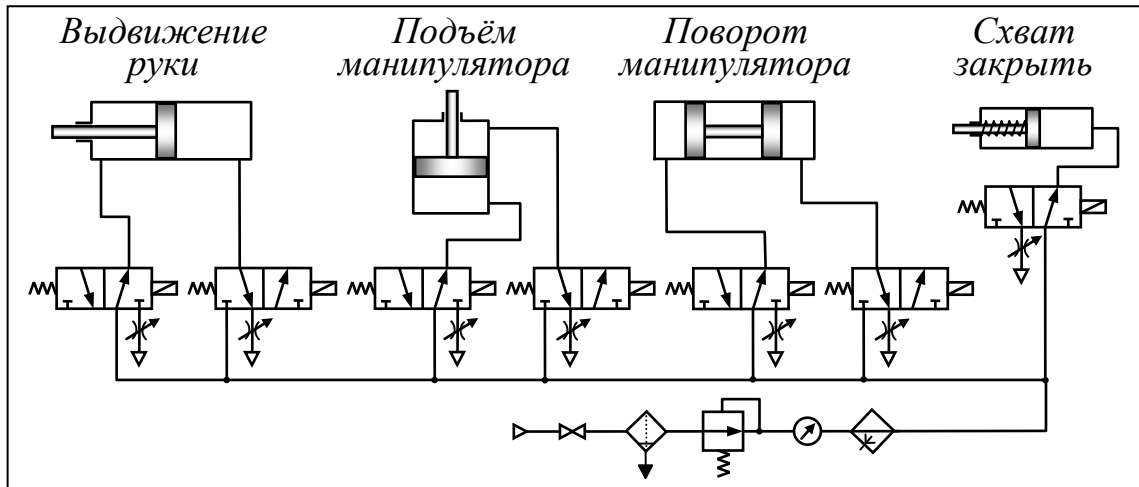


Рис. 6.23 Пневматическая схема робота МП-9С

Число точек позиционирования можно увеличить, если использовать позиционеры (рис. 6.24). Каналы 1...5 служат для вы-

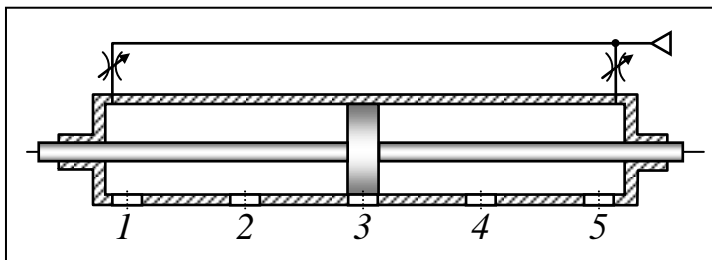


Рис. 6.24 Схема позиционера

хода воздуха в атмосферу. В рабочем положении они закрыты. При открытии по команде одного из каналов давление в полости понижается, и поршень начнёт двигаться до тех

пор, пока этот канал не перекроется и давления в полостях не достигнут равных величин.

Не смотря на технические трудности создания пневматических сервомеханизмов, обусловленные сжимаемостью воздуха, японским робототехникам удалось разработать и использовать в промышленных роботах такие устройства [9].

Структура пневматического сервомеханизма практически полностью совпадает со структурой гидропривода. Функцию золотникового распределительного устройства выполняет пневмореле (рис. 6.25). Оно включает устройство «сопло-заслонка» 1, устройство 2, поддерживающее постоянное давление на выходе 3. Сопло подвижно и закреплено на мембранах 4. В составе

пневматического сервомеханизма два пневмореле включаются по симметричной схеме с общей заслонкой.

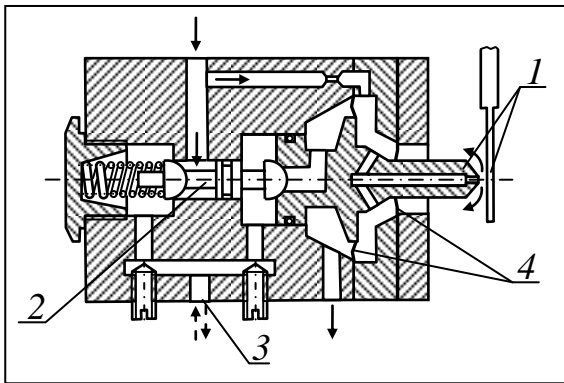


Рис. 6.25 Пневмореле

В сервоусилителе 4 входной управляющий сигнал 5 сравнивается с сигналом обратной связи и определяется разность этих сигналов в виде тока рассогласования. Затем этот ток усиливается до тока управления, который, в свою очередь, поступает в обмотки управления электромагнитного преобразователя 6,

Функциональная схема пневматического сервомеханизма представлена на рис. 6.26, а. Пневмоцилиндр 1 подключен рабочей и штоковой полостями к сервораспределителю 2. На штоке пневмоцилиндра закреплён ползун потенциометра 3, обеспечивающего обратную связь по положению.

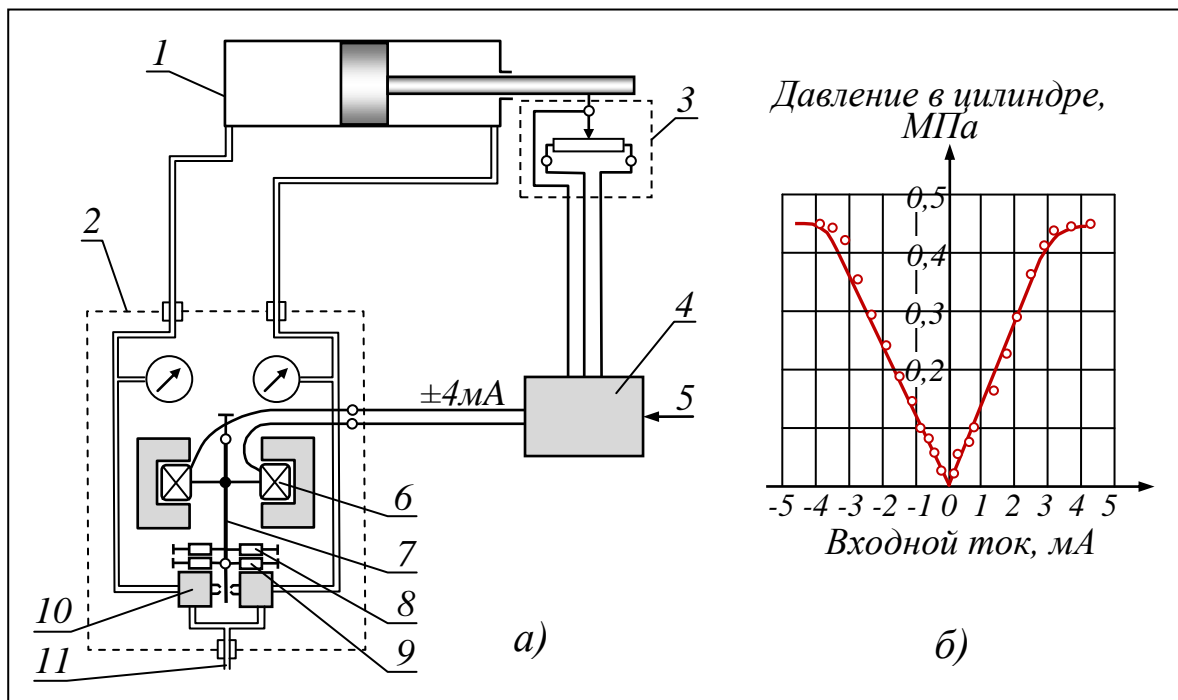


Рис. 6.26 Пневматическая сервосистема и её функциональная характеристика

управляющего положением заслонки 7. Для регулирования коэффициента усиления и установки «нуля» предусмотрены пружины 8 и 9, соответственно. Заслонка 7 расположена между дву-

мя соплами пневмореле 10, каждое из которых направляет рабочее давление воздуха 11 в рабочую или штоковую полости пневмоцилиндра в зависимости от управляющего сигнала.

На рис. 6.26, б представлена зависимость давления в пневмоцилиндре от величины управляющего тока. Как видно из графика, в рабочем диапазоне зависимость имеет практически линейный характер.

6.5 Контрольные вопросы

- 6.1 Что такое сервомеханизм?
- 6.2 Чем отличается разомкнутая система автоматического управления от системы с обратной связью?
- 6.3 Назовите типы сервомеханизмов. Каковы их сравнительные характеристики?
- 6.4 Какие типы двигателей используются в электрических сервомеханизмах?
- 6.5 Каков принцип действия сервомеханизма с высокомоментным двигателем постоянного тока?
- 6.6 Как работает тиристорный преобразователь?
- 6.7 Каков принцип действия вентильного двигателя?
- 6.8 Как регулируется частота вращения ротора асинхронного двигателя в электрическом сервомеханизме?
- 6.9 Каков принцип действия шагового двигателя?
- 6.10 В чём заключаются основные преимущества двигателя «прямого действия» по сравнению с другими типами двигателей?
- 6.11 Какие подсистемы входят в состав электрогидравлических сервомеханизмов?
- 6.12 Как работает устройство «сопло-заслонка»?
- 6.13 Почему сдерживается применение в робототехнике пневматических сервомеханизмов?
- 6.14 Как увеличить количество точек позиционирования в цикловых системах управления роботами?
- 6.15 Каков принцип действия пневматического сервомеханизма?

7 Методы и языки программирования роботов

Методы программирования промышленных роботов определяются типом системы управления. Как указывалось в первой главе, системы управления, делятся на три типа (поколения): программные, адаптивные и интеллектные.

7.1 Программные системы управления

В таких системах управляющая программа содержит определённый объём информации, не меняющийся в процессе работы промышленного робота. Корректирование программы при изменении параметров внешней среды не обеспечивается.

Блоки программы, где содержится информация о требуемом положении звеньев манипулятора и времени отработки требуемых положений объединены *командами* перехода. Они являются простейшими единицами программы.

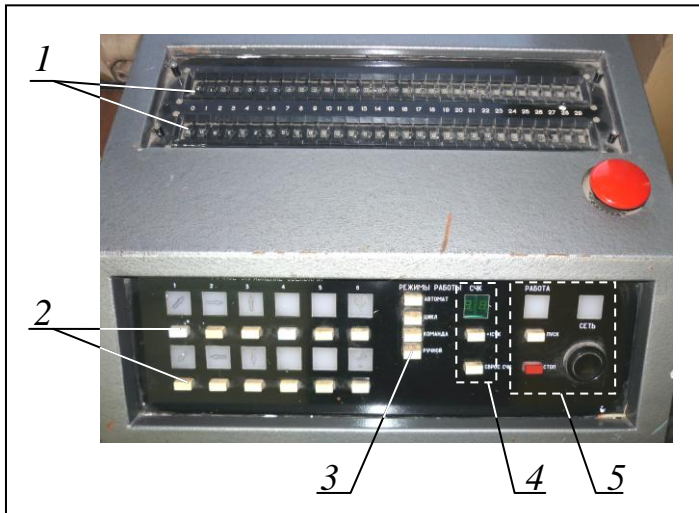
Команда может быть представлена в дискретной или аналоговой форме и соответствует единичной операции робота – перемещение одного звена, открывание схвата, выдержка времени, технологическая команда и т.д. В зависимости от вида единичной операции ей в программе соответствует число, содержащее от одного бита информации (операции типа «вкл–выкл») до 13–14 бит для операций точного перемещения.

Команды в программе объединены в кадры. *Кадр* – это группа команд, имеющих законченный смысл (перемещение схвата в точку пространства при одновременной работе звеньев). Кадры могут объединяться в подпрограммы.

Порядок отработки команд – строго последовательный, либо с возможностью изменения по определённым *внутренним* или *внешним условиям*. Внутренние условия – многократная отработка отдельных участков программы, изменение команд в зависимости от номера цикла (например, при укладывании деталей в тару). Внешние условия – в виде сигналов о ходе протекания технологического процесса и позволяет роботу переходить на другую программу, подпрограмму или пропускать определённые участки программы.

Простейшей программной системой является *цикловая* система управления. Напомним, что она обеспечивает движение звеньев от упора до упора по каждой обобщённой координате и программирует информацию только дискретного вида.

В качестве примера рассмотрим систему циклового программного управления ЭЦПУ-6030, входящую в состав промышленного робота МП-9С. Она представляет собой настольный пульт (рис. 7.1) и содержит две наборные панели декадных переключателей 1, посредством которых набирается программа, блока клавиш ручного управления движением звеньев манипулятора 2, клавиш переключения режимов работы системы 3, клавиш и дисплея счётчика кадров 4 и клавиш пуска-останова системы 5.



Система ЭЦПУ-6030 позволяет программировать в кадре два движения одновременно, выдержки времени, технологические команды управления оборудованием, команды опроса оборудования и логические команды ветвления программы. Она построена по принципу синхронного программного автомата с жёстким циклом и состоит из блоков, показанных на рис. 7.2.

Рис. 7.1 Устройство ЭЦПУ-6030

Система ЭЦПУ-

6030 позволяет программировать в кадре два движения одновременно, выдержки времени, технологические команды управления оборудованием, команды опроса оборудования и логические команды ветвления программы. Она построена по принципу синхронного программного автомата с жёстким циклом и состоит из блоков, показанных на рис. 7.2.

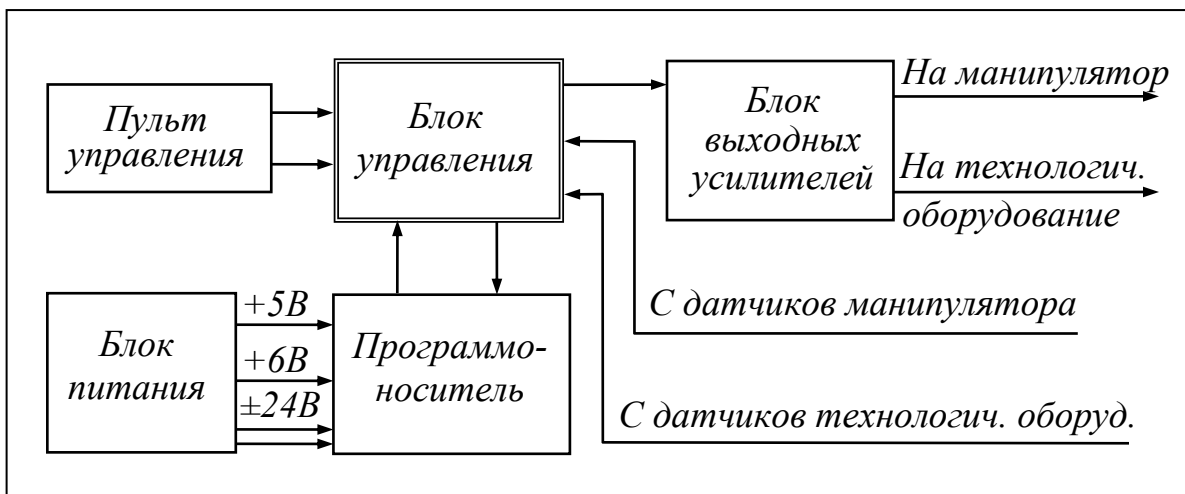


Рис. 7.2 Функциональная схема ЭЦПУ-6030

Блок управления формирует команды управления звеньями манипулятора и технологическим оборудованием на основании информации с программоносителя, сигналов с датчиков и состояния управляющих органов на пульте управления. *Пульт управления* обеспечивает задание режимов работы устройства, выполнение операций включения-выключения питания, запуска в работу, а также ручное управление звеньями манипулятора. *Программоноситель* хранит набранную на нём программу. *Блок усилителей* обеспечивает выдачу управляющих команд на пневмораспределители манипулятора и технологического оборудования. *Блок питания* обеспечивает питание электронного оборудования, датчиков манипулятора и технологического оборудования.









С пульта управления можно задать один из следующих режимов работы устройства: РУЧНОЙ, КОМАНДА, ЦИКЛ, АВТОМАТ. В режиме РУЧНОЙ команды на манипулятор задаются с пульта управления и поступают на блок усилителей и далее на манипулятор для управления его звеньями. В этом режиме звеньям манипулятора посредством нажатия соответствующих клавиш можно подавать команды, мнемоническое изображение которых нанесено на табло над этими клавишами. При выполнении команды соответствующее табло подсвечивается.

В режиме КОМАНДА устройство обеспечивает отработку одного кадра программы, набранной на программоносителе. После отработки кадра происходит остановка устройства. В режиме ЦИКЛ устройство обеспечивает однократную отработку всех кадров программы. В режиме АВТОМАТ обеспечивается многократная отработка рабочего цикла работа.

Система команд ЭЦПУ-6030 приведена в табл. 7.1. Команды 1, ..., 8 приводят в движение звенья манипулятора. Если выполняется одна команда, то вместо звёздочки набирается 0. Команды можно совмещать, например код кадра 1 2 означает одновременное движение руки вперёд и вниз. Технологические команды предназначены для включения или выключения технологического оборудования. Выдержка времени позволяет задержать дальнейшее выполнение программы на 0,1 секунды. Логические команды ПРОПУСК и ПЕРЕХОД служат для организации ветвления программы по внешним условиям. Команда ПЕРЕХОД выполняет переключение на кадр №20, если на одном из каналов

связи с технологическим оборудованием отсутствует сигнал (например, отжат микровыключатель). В противном случае обрабатывается следующий по порядку кадр. По команде ПРОПУСК пропускается следующий за этой командой кадр в случае наличия сигнала на другом канале связи с технологическим оборудованием. В противном случае также выполняется следующий за этой командой кадр.

Таблица 7.1

Номер команды	Наименование команды	Условное обозначение	Код кадра	
			верхнее поле	нижнее поле
1	Выдвижение руки вперёд		1	*
2	Задвижение руки назад		2	*
3	Поворот вправо		3	*
4	Поворот влево		4	*
5	Движение вверх		*	1
6	Движение вниз		*	2
7	Схват открыть		*	5
8	Схват закрыть		*	6
9, ..., 14	Технологические команды 1, ..., 6		9	1, ..., 6
15	Выдержка времени		*	9
16	Пропуск		9	7
17	Переход		9	8
18	Останов		9	9
19	Опрос оборудования 1		7	*
20	Опрос оборудования 2		8	*
21	Опрос оборудования 3		*	7
22	Опрос оборудования 4		*	8
23	Конец программы		0	0

Команда **ОСТАНОВ** служит для остановки устройства, работающего по программе. После устранения причины остановки дальнейшая работа осуществляется нажатием кнопки **ПУСК**.

Команда **КОНЕЦ ПРОГРАММЫ** служит для зацикливания программы работы промышленного робота. При выполнении этой команды счётчик кадров сбрасывается в нулевое состояние, после чего исполнение программы повторяется.

Составление программы рассмотрим на примере работы робототехнического комплекса (РТК) в составе робота МП-9С, штамповочного пресса $Пр$, двух накопителей заготовок – основного H_1 и резервного H_2 (рис. 7.3). В процессе обработки заготовка удерживается в схвате.

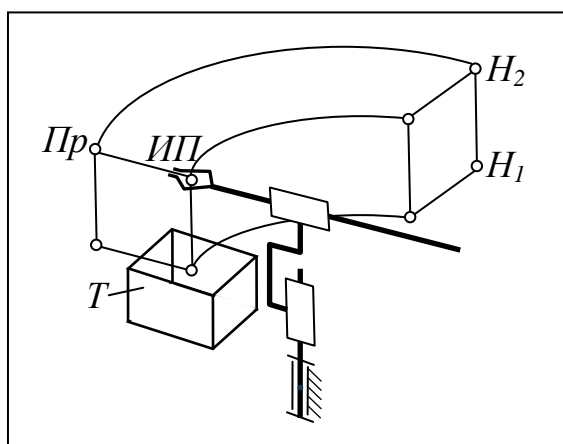


Рис. 7.3 Схема РТК

Сначала загрузка происходит из основного накопителя H_1 . При отсутствии заготовок в нём используется резервный накопитель H_2 . При отсутствии заготовок в обоих накопителях робот останавливается в исходном положении $ИП$. Готовая деталь сбрасывается в положение $ИП$ в тару готовых деталей $Т$.

При составлении программы учтено, что схват манипулятора входит в рабочую зону пресса и выходит из неё только выдвиганием – задвижением руки.

Для нормального функционирования РТК система управления робота связывается информационными каналами с прессом и накопителями. В накопителях устанавливаются конечные микровыключатели. При наличии заготовок в них микровыключатели замкнуты, а при отсутствии – разомкнуты.

Программа работы РТК представлена в табл. 7.2. Работа программы начинается с кадра №0 анализом наличия заготовок в накопителе H_1 . Если там заготовки есть, то выполняются команды кадров 1...10. В противном случае управление передаётся на кадр №20. В этом кадре анализируется наличие заготовок в накопителе H_2 .

Таблица 7.2

Номер кадра	Код команд	Описание команд
0	9 8	<i>Переход</i> на кадр №20 при отсутствии заготовок в H_1
1	3 2	Поворот вправо с одновременным опусканием вниз
2	1 0	Выдвижение руки в накопитель H_1
3	0 6	Зажать схватом заготовку в накопителе H_1
4	2 0	Задвинуть руку с заготовкой из накопителя H_1
5	4 1	Поднять вверх с одновременным поворотом влево
6	1 0	Выдвинуть руку и поместить заготовку в пресс
7	9 1	Технологическая команда включения пресса
8	2 0	Задвинуть руку – вынуть из пресса готовую деталь
9	0 5	Открыть схват, готовая деталь упадет в тару
10	0 0	<i>Конец</i> – зациклить программу (перейти к кадру №0)
...
20	9 7	<i>Пропуск</i> кадра №21, если есть заготовки в накопит. H_2
21	9 9	<i>Останов</i> , если нет заготовок в накопителе H_2
22	3 1	Поворот вправо с выдвижением руки к накопителю H_2
23	2 6	Закрывать схват и задвинуть руку с заготовкой
24	4 0	Повернуть руку влево
25	1 0	Выдвинуть руку и поместить заготовку в пресс
26	9 1	Технологическая команда включения пресса
27	2 0	Задвинуть руку – вынуть из пресса готовую деталь
28	0 5	Открыть схват, готовая деталь упадет в тару
29	0 0	<i>Конец</i> – зациклить программу (перейти к кадру №0)

При их отсутствии выполняется команда ОСТАНОВ в кадре №21, в противном случае этот кадр пропускается и выполняется последовательность кадров 22...29, описывающих работу робота с накопителем H_2 . Таким образом, в программе использованы логические команды ПЕРЕХОД и ПРОПУСК, организующие её ветвление по внешним условиям.

Рассмотренный пример программирования робота МП-9С иллюстрирует использование специально разработанного алгоритмического языка. Такой способ программирования называют *эвристическим*. Кроме такого способа существует другой; он называется *обучением*. Суть этого способа программирования заключается в том, что на этапе обучения оператор вручную выполняет эталонную последовательность действий робота. Система управления, при этом, запоминает последовательность действий. После переключения в автоматический режим многократно

воспроизводится записанная в памяти программа. Следует отметить, что данный способ, хотя и не требует высокой квалификации программиста, не может программировать процессы со сложной и разветвлённой логикой управления. Поэтому в последнее время получил распространение *комбинированный* способ программирования, когда элементы обучения используются для задания координат узловых точек пространства, где необходимо «побывать» роботу. Это исключает необходимость многократного решения обратной задачи кинематики. Все остальные элементы программы, включающие последовательность действий и логику ветвления, записываются с помощью алгоритмического языка.

В настоящее время нашли своё развитие два метода разработки алгоритмических языков программирования промышленных роботов. Первый заключается в разработке нового специального для робота языка. Его синтаксис максимально приспособлен к роботу, понятен и экономичен насколько это возможно. Примером такого языка является приведённый выше язык программирования робота МП-9С. Второй метод базируется на использовании традиционного универсального языка высокого уровня, например Фортрана, Бейсика, Паскаля, Си и т.д. В этом случае нужна проблемно-ориентированная надстройка над этим широко используемым языком, чтобы задавать управляющие команды манипулятору и технологическому оборудованию.

Показательным в этом отношении является разработанный в конце прошлого века одной из крупнейших фирм по производству роботов «Юнимейт» (США) язык *VAL* [10]. Он построен на основе алгоритмического языка высокого уровня Бейсик.

Важный фактор при программировании на языке *VAL* – физическое определение положений точек с помощью панели обучения. На этапе обучения обеспечивается связь между роботом и программой с помощью таких терминов как *POINTA*, *POINTB* и т.п. Наименованием положения может быть любой набор латинских букв. Панель обучения не используется для показа всех точек, где должен быть робот. Необходимо указать только несколько основных: расположение станка, конец конвейера, тара для деталей или заготовок и т.д. Тысячи других точек, в которых дол-

жен побывать робот, могут быть заданы от этих основных точек. В этом и проявляется сила языке *VAL*.

На этапе обучения после вывода схвата робота в точку вручную, оператор-программист набирает на клавиатуре команду *HERE* (здесь), а затем вводит символическое имя точки, которое затем будет использоваться в программе.

Команды на языке *VAL* имеют такой же формат, как и в Бейсике. Например:

65	<i>APPRO</i>	<i>MACH</i>	50
метка	«приблизиться»	имя точки	расстояние в мм до точки приближения

На одной строке располагается одна команда, основное поле – командное слово отделяется от других командных слов пробелом, параметры в команде отделяются запятыми. Команда может иметь метку для организации ветвления.

Покажем, как составляется программа на языке *VAL*. Ведь известно, что наиболее эффективный метод изучения нового языка – попытка начать использовать его, не дожидаясь полного освоения. Например, составим программу взятия роботом предмета в точке *A* и его перемещения в точку *B*.

<i>A.TO.B</i>	(название программы)
<i>OPEN</i>	(открыть схват)
<i>MOVE A</i>	(переместить схват в точку <i>A</i>)
<i>CLOSEI</i>	(закрыть схват немедленно)
<i>MOVE B</i>	(переместить схват в точку <i>B</i>)
<i>END</i>	(конец программы)

Это работоспособная программа, хотя и далека от совершенства. Отметим, что команда *OPEN* означает открытие схвата во время выполнения следующей команды. Команда *OPENI* означает открытие схвата немедленно.

По команде *MOVE* схват обязательно придёт в указанную точку, но не обязательно по прямой линии. И в подавляющем большинстве случаев рука сойдёт предмет. Кроме того во время перемещения руки к позиции *B* перемещение происходит прямолинейно, и, если позиции *A* и *B* находятся на поверхности стола, рука будет скрести по ней. Наконец, программа заканчивается,

когда зажатый в схвате предмет находится над позицией B , куда робот должен был этот предмет поместить. Усовершенствуем программу $A.TO.B$:

```

BETTER.A.TO.B (имя улучшенной программы)
OPEN
APPRO A,25   (подойти к позиции  $A$  на расстояние 25 мм)
MOVE A
CLOSEI
DEPART 25   (отойти от позиции  $A$  на 25 мм)
APPRO B,25   (подойти к позиции  $B$  на расстояние 25 мм)
MOVE B
OPENI
DEPART 25   (отойти от позиции  $B$  на 25 мм)
END

```

Команда *APPRO* заставляет руку зависнуть непосредственно над заданной точкой, вместо того, чтобы прямо прийти в неё. Выражение «зависнуть» является неточным, т.к. предмет может быть прикреплен к вертикальной стене и даже к потолку.

Вне зависимости от расположения поверхности, с которой берётся предмет, и угла, под которым двигается рука робота, захват устанавливается так, чтобы подход к предмету осуществлялся за счёт *смещения по оси z* в системе координат схвата. На рис. 7.4 показана абсолютная система координат $(x_0y_0z_0)$ и система координат схвата (xyz) промышленного робота «Пума-560» фирмы Юнимейт.

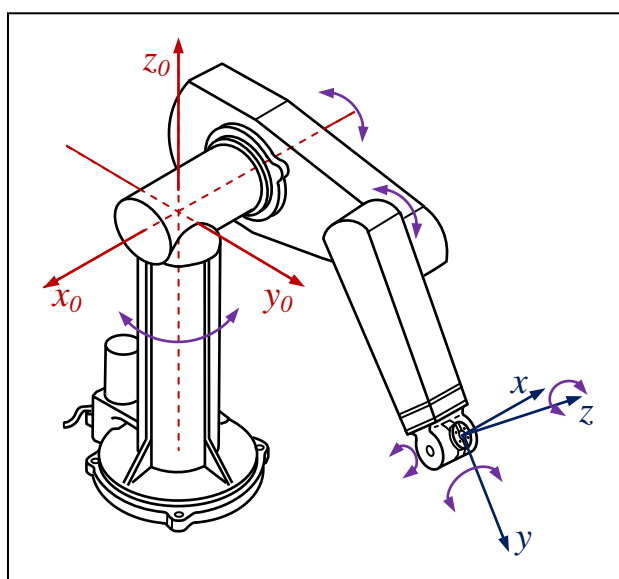


Рис. 7.4 Робот «Пума-560»

Ось z системы координат схвата ориентируется в процессе обучения по команде *HERE*, подаваемой с клавиатуры. Фактически угол подхода к позиции A можно изменить по сравнению с углом подхода к позиции B , просто изменив ориентацию схвата во время позиционирования в режиме обучения

по команде *HERE B*.

Программа на языке *VAL* будет выполняться столько раз, сколько указано в команде *EXECUTE*. Если таких указаний нет, то один раз. Если вместо числа повторений набрать отрицательное число, то программа будет выполняться бесконечно, пока не будет остановлена командой *ABORT* (сокращённо *A*).

В любом месте программы скорость её отработки может быть изменена командой *SPEED* (сокращённо *SP*) с клавиатуры. Целое число после этой команды представляет собой в процентах долю изменения стандартной скорости в диапазоне 0...327%.

Используя возможности языка *VAL*, можно применить программные циклы, заставляющие робот каждый раз слегка изменять положение позиции *A* с тем, чтобы, например, разгрузить поддон с изделиями (рис. 7.5). После разгрузки поддона пусть на

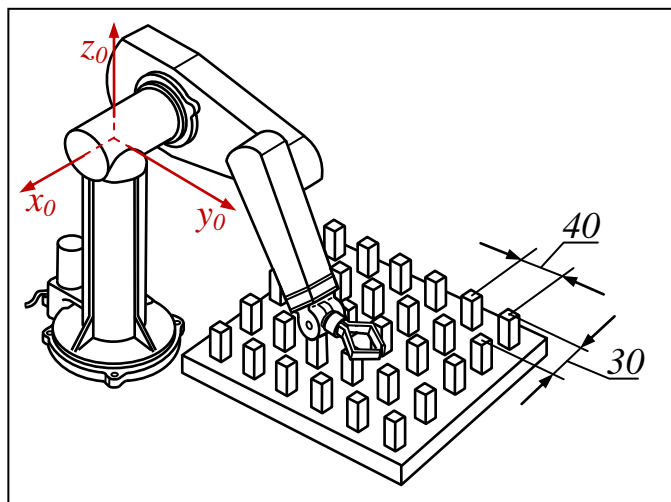


Рис. 7.5 Схема разгрузки поддона

экране появится соответствующая надпись и робот будет ждать установки следующего поддона.

В программе будет обращение к специально разработанной подпрограмме *TRAY*. В ней едином блоке представлена последовательность команд, чтобы сдвигать руку на 40 мм по ряду. Затем, закончив ряд, рука перемещается назад в крайнее положение, чтобы начать новый ряд. Для перехода в новый ряд руку надо сдвинуть на 30 мм вдоль отрицательной полуоси x_0 .

Текст основной программы представлен ниже.

	<i>TRAY.TO.B</i>	(имя программы)
95	<i>SET A</i>	(перевести схват в точку <i>A</i>)
	<i>SETI NBR=0</i>	(ввести целочисленную переменную <i>NBR=0</i> . Эта переменная относится к подсчёту деталей до 30 во время установки в позицию <i>B</i>)
85	<i>GOSUB TRAY</i>	(обращение к подпрограмме <i>TRAY</i>)

OPEN
APPRO A,25
MOVE A
CLOSEI
DEPART 25
APPRO B,25
MOVE B
OPENI
DEPART 25
SETI NBR=NBR+1 (прибавить единицу к сумме
каждый раз, когда очередная
деталь перенесена в поз. *B*)

IF NBR LT 30 THEN 85 (если сумма *NBR* ещё не рав-
на 30, перейти к метке 85)

TYPE NEW TRAY, PLEASE (вывести на экран «новый
поддон, пожалуйста»)

DEAY 30 (ожидать новый поддон 30 с)
GOTO 95 (перейти к строке с меткой 95
и начать сначала)

END

Текст подпрограммы *TRAY*

SUBROUTINE TRAY (имя подпрограммы)

IF NBR EQ 0 THEN 60 (если это первая деталь в углу
поддона, не сдвигаясь перейти к
метке 60)

IF COL EQ 6 THEN 50 (если номер колонки *COL* уже ра-
вен 6, ряд закончен, можно перей-
ти к первой колонке слева и на-
чать новый ряд. Для этого перейти
к метке 50)

SHIFT A BY 0,40 (переместиться в ряду на 40 мм по
оси y_0)

SETI COL=COL+1 (при подсчёте количества прой-
денных колонок добавить 1)

RETURN (вернуться в основную программу)

<i>50 SHIFT A BY 30,-200</i>	(переместиться на расстояние (5·40) мм назад по оси y_0 и сдвинуться на 30 мм к новому ряду)
<i>60 SETI COL=1</i>	(приравнять целочисленную переменную <i>COL</i> единице, чтобы показать, что начинается новый ряд с крайней левой колонки)
<i>RETURN</i>	(вернуться в основную программу)
<i>END</i>	

Команда *SHIFT* допускает сдвиг и по трём осям абсолютной системы координат. Например, команда *SHIFT BY 25,-8,16* заставит схват сдвинуться по осям x_0 , y_0 и z_0 соответственно на 25, -8 и 16 мм.

Другая новая команда *SETI* позволяет устанавливать значения целочисленной переменной (*I* означает целое число). Имеется команда *SET* (не путать с *SETI*). Она используется, чтобы установить координаты позиции с данным именем, если они совпадают с координатами другой позиции, уже записанными в память на этапе обучения.

Попытаемся усовершенствовать разработанную программу разгрузки поддона. Ведь ожидание 30 секунд – это не самое лучшее решение, т.к. время, напрасно потраченное на простой робота, когда поддон уже заменён, может решительным образом повлиять на оценку экономической эффективности внедрения робота.

Целесообразно использовать датчик, который информирует робот об установке поддона. Кроме этого робот может информировать автоматическую систему о готовности разгружать следующий поддон. Это заставит систему, подающую поддоны, работать. В этом случае не нужны команды *TYPE* и *DELAY 30*. Улучшенная программа будет выглядеть так:

BEST (имя улучшенной программы)

...(первые 14 команд не изменены)...

SIGNAL 1 (подать сигнал на выходной канал №1, чтобы информировать систему подачи поддонов о готовности к работе)

WAIT 1 (ожидать появления входного сигнала на входном канале №1, что должно свидетельствовать об установке нового поддона)
SIGNAL -1 (снять сигнал готовности робота, как только робот начнёт разгружать новый поддон)
GOTO 95
END

Выходной сигнал от робота или входной сигнал, подаваемый на вход робота, может быть двух уровней – высокий и низкий. Знак при номере входного или выходного сигнала означает его уровень. Например: *SIGNAL 6,-3,5* означает одновременно подать высокие сигналы на 6 и 5 каналы и низкий – на 3 канал.

Инструкция *WAIT* может задействовать только один входной канал. Имеются и другие инструкции, позволяющие роботу быстрее реагировать на внешние воздействия. Например, команда *REACTI -2, DANGER, ALWAYS* предписывает роботу немедленно прервать выполнение любых действий, как только уровень на канале 2 становится низким и сразу же перейти к выполнению подпрограммы *DANGER* (опасность). Целью при этом может быть, например, остановка робота, если датчик регистрирует нарушение человеком или предметом границ рабочего пространства.

Отличие от команды *WAIT* заключается в том, что здесь робот будет *неподвижен*, пока он «ожидает» подачи на вход сигнала. Если же указана инструкция *REACTI*, то робот будет продолжать функционировать, пока удовлетворяются условия на входе, которые действительно прервут его работу, или программа не отменит инструкцию *REACTI* соответствующей инструкцией *IGNORE*. Например:

...
REACTI -2, DANGER, ALWAYS (робот находится наготове, следя за уровнем сигнала на входе канала 2. Если появится сигнал на 2 канале, то идти к подпрограмме *DANGER*)
 ...

IGNORE 2, ALWAYS

...

END

SUBROUTINE DANGER (подпрограмма «опасность»)

...

Изложенные здесь сведения о языке *VAL* не отражают всех его возможностей. Но они дают представление о некоторых задачах управления роботами и путях их решения при помощи такого мощного языка программирования.

Представленные в качестве примеров языки программирования показывают, что оператор-программист может взаимодействовать с роботом через систему управления на разных уровнях иерархии этой системы. Причём каждому уровню соответствует свой входной язык программирования. Различают четыре таких уровня иерархии систем управления.

Первый уровень – уровень отдельных степеней подвижности. Здесь задаётся движение манипулятора в терминах или управляющих сигналах на *каждую* степень подвижности. Возможно задание численных значений обобщённых координат. Язык программирования робота МП-9С – язык первого уровня.

Второй (тактический) уровень – уровень манипулятора. Оператор-программист задаёт координаты и ориентацию схвата, не заботясь о состоянии отдельных степеней подвижности. Язык *VAL* – язык второго уровня.

Третий (стратегический) уровень – объектный уровень. На языке стратегического уровня задание формируется путём указания операций, которые необходимо выполнить. Программа операции разгрузки поддона роботом «Пума-560» на языке третьего уровня не требует предварительного обучения робота узловым точкам *A* и *B* и не требует расчёта и программирования движения схвата по рядам от колонки – к колонке.

Четвёртый уровень – уровень программирования в терминах «что сделать?» (а не «как сделать?»). Здесь формируется задание в целом без детализации на нижних уровнях. Та же программа разгрузки поддона четвёртого уровня будет содержать только одну команду – «разгрузить поддон».

В настоящее время реализованы и используются в промышленности только языки первого и второго уровней.

Программирование системы управления третьего уровня предполагает наличие у робота развитой системы сенсорных устройств, в том числе органов технического зрения. Такие роботы называются адаптивными. Роботы, программируемые на языке четвертого уровня должны обладать элементами искусственного интеллекта и обладать способностью к самообучению.

7.2 Адаптивные системы управления

Задача построения адаптивной системы управления включает принятие от системы очувствления робота информацию о состоянии внешней среды, обработать эту информацию и сформировать на этом основании адаптивное управление. Все остальные функции программного обеспечения по управлению движением звеньев адаптивного робота совпадают с соответствующими функциями программного робота.

Для иллюстрации этого обстоятельства рассмотрим приведённый ранее пример разгрузки роботом поддона с деталями (рис. 7.6). Для программного робота последовательность обхода точек позиционирования строго определяется программой (см. выше программы *TRAY.TO.V* или *BEST*). Для адаптивного робота вторая половина функций системы управления полностью совпадает с функциями программного робота.

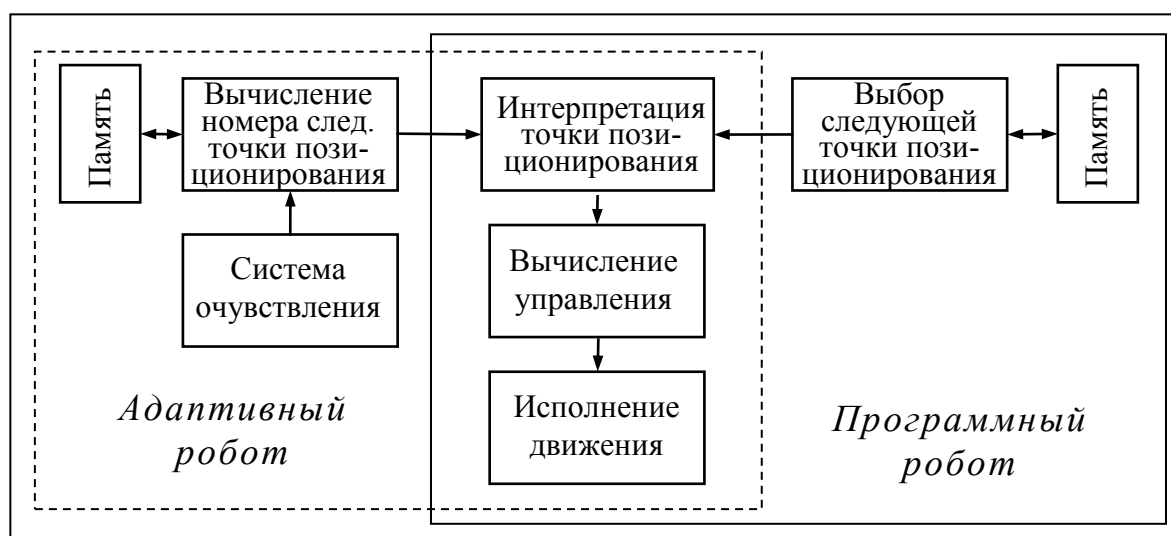


Рис. 7.6 Функции программного и адаптивного роботов

Такое совпадение не является случайным. Оно является общей закономерностью, присущей адаптивным роботам с достаточно высокой степенью адаптации и отражает иерархическую структуру управления.

Иерархия – это способ организации системы, когда она представляется в виде многоуровневого набора взаимодействующих подсистем, называемых уровнями иерархии, обладающими определёнными свойствами:

- каждая из подсистем ответственна за решение ограниченной строго определённой части задачи;
- каждая подсистема имеет доступ к ограниченной информации, требуемой только для решения своей задачи;
- каждый уровень иерархии находится в подчинённом положении по отношению к вышестоящему уровню;
- принимая и исполняя поступающие от верхнего уровня команды, он является, в то же время, источником команд и данных для нижестоящего уровня.

Многоуровневая иерархическая организация системы управления адаптивного робота во многом определяется степенью его адаптации. Так для простейшей параметрической адаптации может быть затронут только уровень привода (например, сильнее сжать деталь). С другой стороны адаптация, близкая к искусственному интеллекту, требует большого числа уровней иерархии.

Число уровней системы управления адаптивного робота зависит также от того, каким образом оператор-программист формулирует ему задание. Например, если в задании будут перечисляться точки позиционирования (а промежуточные точки – с помощью системы осязательства), то система управления мало будет отличаться от системы управления программного робота. Если задание формулируется на некотором проблемно-ориентированном языке, то число уровней будет больше, чем выше уровень языка. В этом случае все функции, связанные с разбиением задачи на подзадачи, планированием выполнения каждой задачи берёт на себя система управления.

Свойство адаптивных систем выполнять задание в условиях недетерминированной внешней среды обеспечивается при наличии в структуре системы минимум двух уровней:

- обработка информации о внешней среде;
- генерация управления для нижнего уровня вычисления управления.

Следовательно, многоуровневая построенная по иерархической структуре система управления робота при формировании адаптивного закона управления должна взаимодействовать с развитой системой сенсорных устройств.

7.3 Сенсорные устройства адаптивных роботов

Сенсорные устройства исполняют роль технических органов чувств роботов. При этом различают «ощущения» двух типов:

- робот должен чувствовать «себя», т.е. с помощью датчиков фиксировать результаты своих движений и оценивать их правильность;
- робот должен чувствовать окружающую обстановку, т.е. соотносить своё положение и свои перемещения с расположением внешних для него предметов и их движениями.

Ощущение роботом «себя» создают с помощью датчиков, измеряющих положения отдельных звеньев робота, скорости перемещения по каждой степени подвижности.

Информация об окружающем пространстве создаётся с помощью приборов, регистрирующих геометрические, физические или химические свойства окружающей среды.

С позиций адаптивного управления наибольший интерес представляют приборы, снабжающие робота информацией от внешнего по отношению к нему мира.

Классификация сенсорных устройств роботов приведена на рис. 7.7. Особое место среди прочих сенсорных устройств занимают *визуальные* системы. Известно, что 80% информации о внешней среде человек получает с помощью глаз. Поэтому визуальные системы или системы технического зрения являются наиболее информативными. В качестве органов технического зрения используют видеокамеры (аналоговые или цифровые), а также фотоматрицы, состоящие из фотодиодов. Вопросы использования визуальных систем изучены достаточно полно, разработано соответствующее программное обеспечение по распознаванию обра-

зов. Это позволяет предположить в будущем широкое применение систем искусственного зрения для решения задач распознавания объектов в условиях большого спектра помех.

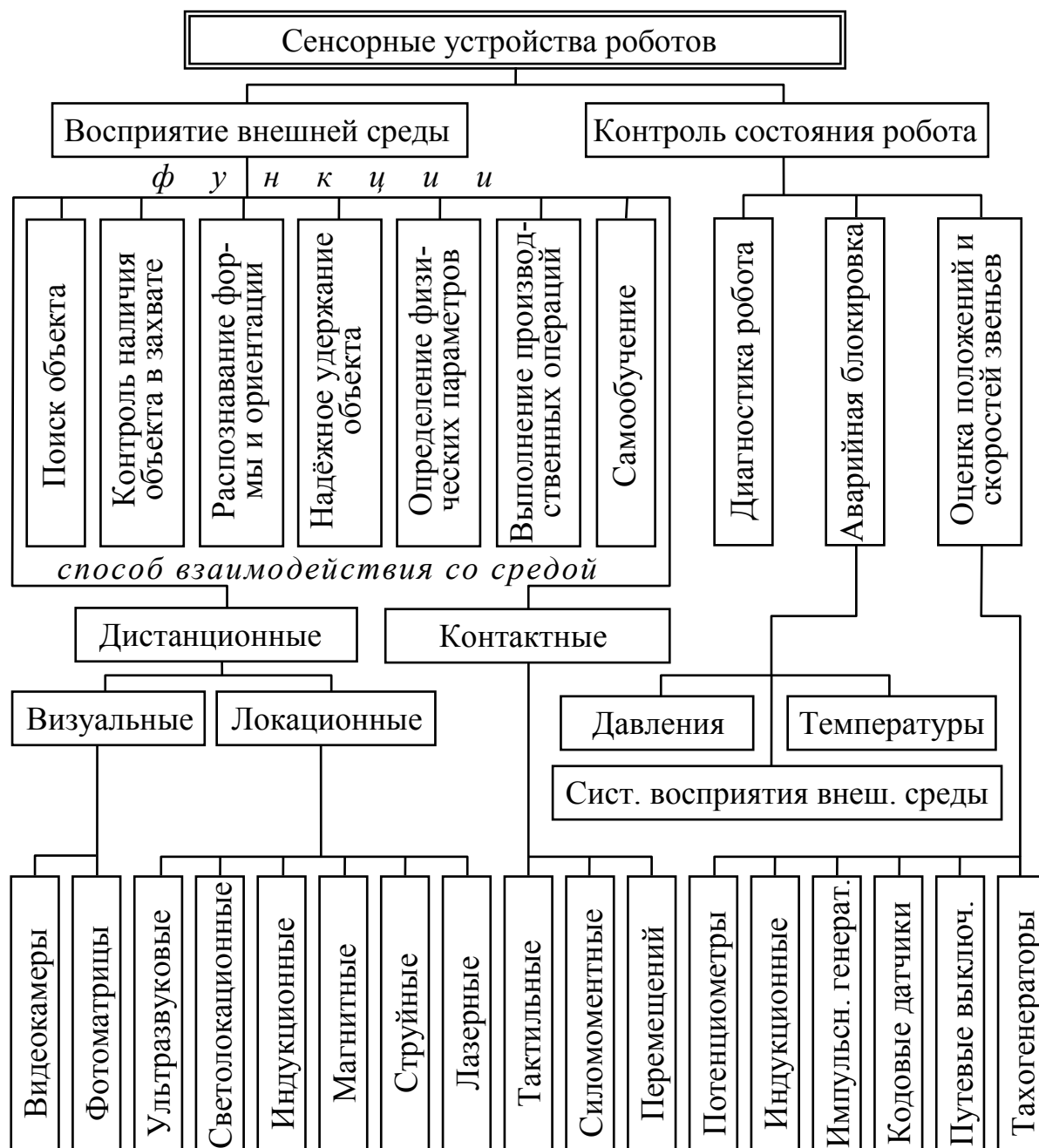


Рис. 7.7 Классификация сенсорных устройств роботов

Локационные системы ввиду отсутствия непосредственного контакта с объектом обладают высокой надёжностью и делятся на два класса: дальней локации и ближней локации. К системам дальней локации относятся ультразвуковые, светолокационные и лазерные дальномеры.

Ультразвуковые дальномеры позволяют измерять расстояния до объекта от 0,2 до 2 метров с погрешностью 2%. Локационные устройства на основе лазерных излучателей гораздо точнее ультразвуковых, однако пока не получили широкого распространения в робототехнике. Светолокационные системы – наиболее перспективны, их точность составляет 2 мм на расстоянии двух метров.

К системам ближней локации относятся струйные, магнитные и индукционные датчики. Наилучшими эксплуатационными характеристиками обладают магнитные и струйные. Принцип действия струйного датчика основан на измерении расхода воздуха, проходящего через зазор между пневмосоплом и объектом. Магнитный и индукционный (вихретоковый) датчики устроены одинаково. Они состоят из обмотки на магнитном сердечнике, залитом полимером в стальном цилиндрическом корпусе. Для питания обмотки магнитного датчика используют постоянное или низкой частоты (200 ... 300 Гц) напряжение. Принцип действия основан на измерении напряжённости магнитного поля вблизи металлических объектов. В индукционном датчике возбуждается высокочастотное (до 50 МГц) магнитное поле. Принцип действия основан на индуцировании вихревых токов вблизи металлических предметов и измерении изменяющихся параметров магнитного поля. Диапазон измерения расстояния магнитными и индукционными датчиками: 0,001 ... 0,1 м с погрешностью 3...5%.

Задачи, решаемые с помощью локационных датчиков, и особенности их применения описаны в табл. 7.1

Таблица 7.1

Задача	Датчик	Особенности применения
Контроль наличия детали	Струйный, светолокационный	Просвечивается пространство в захвате
Распознавание формы и местоположения внешних объектов	Светолокационный, ультразвуковой, лазерный	Применение дискретной строки фотодатчиков на конвейере. Использование ультразвукового рецептивного поля
Автоматическое слежение за требуемой траекторией	Индукционный, светолокационный	Располагается впереди зоны сварки. Для мобильных роботов
Контроль управл. сборочным роботом	Струйный	Очувствление сменных захватов

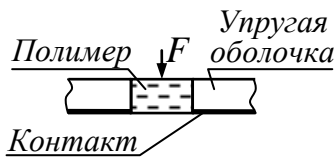
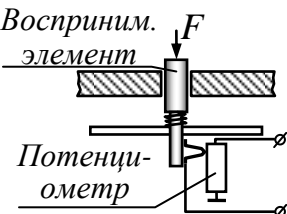

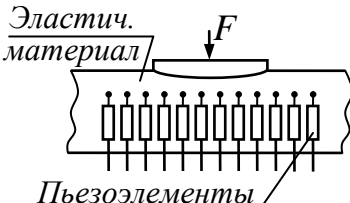
Особенность работы системы искусственного осязания (тактильных датчиков) заключается в наличии контакта с поверхностью объекта. С их помощью решаются следующие задачи:

- поиск и обнаружение объектов;
- схватывание и манипулирование объектами;
- распознавание формы объектов;
- определение физических свойств объектов (массы, твёрдости, шероховатости, температуры, электропроводности и т.д.);
- контроль за микроперемещениями деталей при сборке.

Датчики располагают обычно на наружной и внутренней поверхностях захвата. Объединение тактильных датчиков в матрицы добавляет новую размерность. Это позволяет получать информацию о зоне контакта. Форма зоны контакта может быть использована для распознавания формы предметов.

В табл. 7.2 представлены датчики тактильных матриц и описаны принципы их работы.

Таблица 7.2

Матрица	Конструкция датчика	Принцип действия
На основе электропроводящих полимеров		Изменение давления приводит к изменению сопротивления полимера в диапазоне 100 ± 1 кОм
На основе реостатных потенциометров		Перемещение воспринимаемого элемента приводит в движение скользящий контакт потенциометра
На основе тензорезисторов		Усилие приводит к деформации тензобалки. Измеряется сопротивление тензорезисторов
На основе пьезоэлектрического преобразователя		Усилие приводит к появлению в пьезоэлементах электрического потенциала

Применение матриц требует разработки специальных алгоритмов обработки информации, позволяющих на основе межсен-

сорного взаимодействия осуществлять как одномоментное распознавание формы трёхмерных объектов, так и распознавание путём активного ощупывания их поверхности.

Силомоментные датчики предназначены для измерения компонент главного вектора и главного момента сил, действующих на захват манипулятора. Их устанавливают либо непосредственно на схват, либо на звено перед схватом, когда он сменный.

Преобразование сил в электрический сигнал в рассматриваемых датчиках осуществляется двумя способами:

- измерением упругих деформаций чувствительных элементов датчика посредством тензорезисторов, пьезоэлектрических или магнитоупругих преобразователей;
- измерением микроперемещений калиброванных пружин ёмкостными, магнитными или оптическими методами измерения малых перемещений.

Первый способ – измерение усилий с помощью тензорезисторов – самый распространённый. При этом используют как проволочные (фольговые), так и полупроводниковые тензорезисторы. Последние представляют собой пластинку кремния с приваренными выводными проводниками. Проволочные или фольговые тензорезисторы, хотя и более просты и дешевле, имеют в

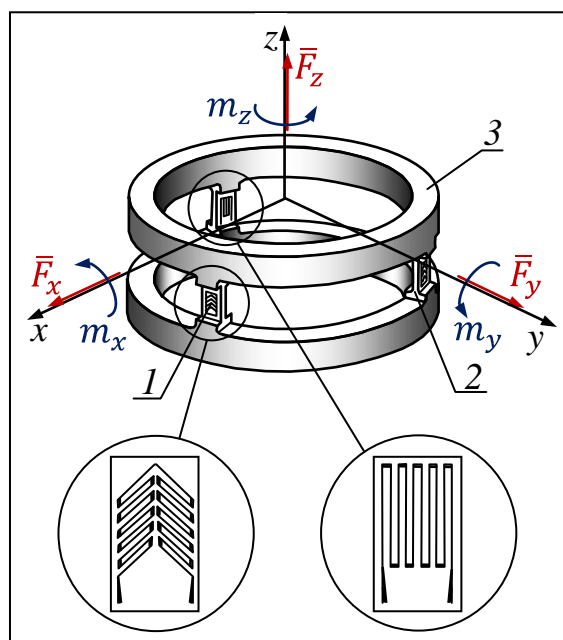


Рис. 7.8 Шестикомпонентный датчик сил

несколько десятков раз меньшую чувствительность к деформациям.

На рис. 7.8 изображён шестикомпонентный датчик сил и моментов с шестью фольговыми тензорезисторами 1. Они обеспечивают измерение всех деформаций, возникающих в упругих элементах 2, под действием произвольно направленных сил и моментов, приложенных к одному из фланцев 3 датчика. Выделение проекций вектора сил \bar{F}_x , \bar{F}_y , \bar{F}_z и моментов m_x , m_y , m_z осуществляется

путём предварительного тарирования, которое заключается в следующем. К датчику поочерёдно по каждой координате прикладывают силу (или момент) заданного значения и регистрируют уровень выходного сигнала на каждом тензорезисторе. Обработка сигналов в реальном времени требует большого объёма вычислений – это недостаток данного датчика.

Пьезоэлектрические датчики используют в основном в тактильных матрицах, описанных выше. В силомоментных датчиках их применение ограничено из-за их существенного недостатка – постепенного «стекания» заряда.

Магнитоупругие преобразователи (рис. 7.9) работают на принципе изменения магнитных свойств ферромагнитных мате-

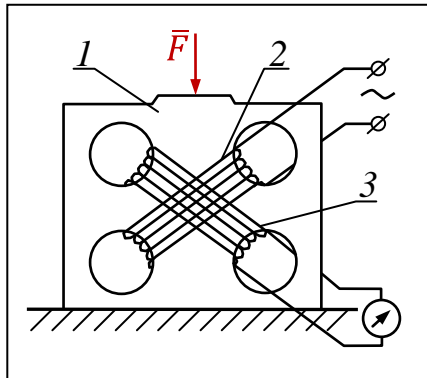


Рис. 7.9 Магнитоупругий датчик сил

риалов под действием механических напряжений и состоят из чувствительного элемента 1, обмотки возбуждения 2 и измерительной обмотки 3. Существенное преимущество этих датчиков заключается в возможности их использования в экстремальных условиях – при высоком давлении, влажности и температуре. Воспринимаемые датчиком нагрузки – от 1000 Н и более. Обычно их ставят на координатные столы, с которыми работают роботы. Недостаток таких датчиков – невысокая точность.

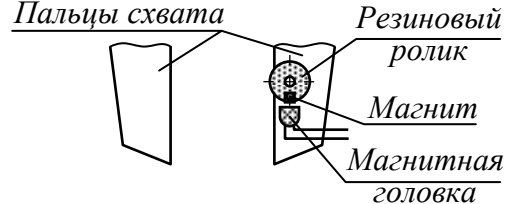
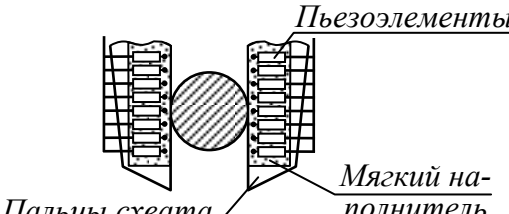
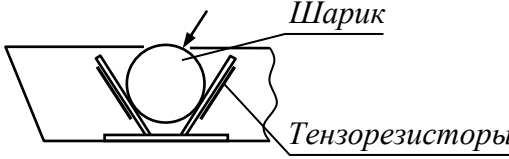
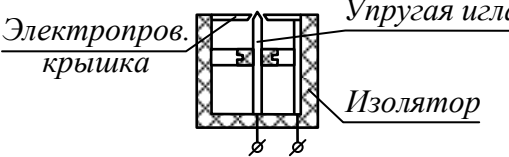
Датчики перемещений служат для захватывания и надёжного удержания объектов в схвате без их деформации. Схемы и принципы их действия представлены в табл. 7.3. Все эти датчики фиксируют малые проскальзывания объектов относительно губок схвата. Сигналы с датчиков поступают в систему управления роботом, которая регулирует усилие сжатия схвата.

Датчики перемещений служат для захватывания и надёжного удержания объектов в схвате без их деформации. Схемы и принципы их действия представлены в табл. 7.3. Все эти датчики фиксируют малые проскальзывания объектов относительно губок схвата. Сигналы с датчиков поступают в систему управления роботом, которая регулирует усилие сжатия схвата.

Таблица 7.3

№	Схема датчика	Принцип действия
1	<p>Металлич. амортизатор</p> <p>Сапфировый сердечник</p> <p>Пьезоэлемент</p> <p>Резиновый амортизатор</p>	Микронеровности объекта при его перемещении вызывают появление электрического сигнала на пьезоэлементе

Продолжение табл. 7.3

2		Перемещение объекта вызывает вращение ролика, что регистрируется магнитной головкой
3		Изменение состояния отдельных пьезоэлементов характеризует наличие перемещения объекта
4		Перемещение объекта вызывает неодинаковый изгиб тензобалок
5		При перемещении объекта игла изгибается и замыкает цепь с электропроводящей крышкой

Системы контроля состояния робота обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики, включая эксплуатационную надёжность, и участвуют в организации требуемых параметров движения звеньев. Некоторые из них входят в состав сервомеханизмов. Это датчики обратной связи по положению (потенциометры, индуктивные и индукционные датчики типа вращающихся трансформаторов, импульсные генераторы, кодовые датчики) и скорости (тахогенераторы).

Потенциометры – самые простые по конструкции датчики положения. Основной их недостаток – низкая надёжность из-за наличия подвижного контакта. Погрешность измерения – 0,05%.

В индукционных датчиках (вращающихся трансформаторах) выходное напряжение есть функция угла поворота, когда одна обмотка входит внутрь другой обмотки. Недостаток – необходимость в аналого-цифровом преобразователе, погрешность измерения таких датчиков – 0,2 ... 0,02%.

В последнее время всё большее распространение в робототехнике имеют оптоэлектронные потенциометры, выходной сиг-

нал которых представляет собой цифровой код. К таким потенциометрам относятся *импульсные генераторы*, в которых угол поворота преобразуется в последовательность импульсов, и *кодовые датчики* (рис. 7.10), где тот же угол преобразуется в дискретный двоичный код. Основным элементом кодового датчика является оптический диск 1. Он разделён на кольцевые оптические дорожки.

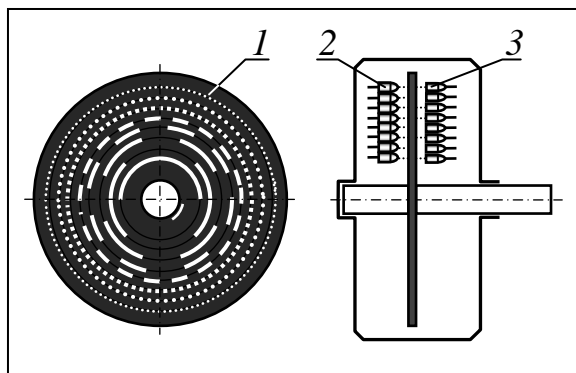


Рис. 7.10 Кодовый датчик

Число этих дорожек определяет разрядность датчика. Бывают восьми и двенадцатиразрядные датчики. На кольцевой дорожке, расположенной ближе всего к центру оптического диска, тёмные и светлые полосы чередуются через 180° , на следующей – через каждые 90° , затем – через 45° и т.д., в зависимости от количества дорожек на диске. С одной стороны диска против каждой дорожки установлен источник светового луча – светодиод 2, а с другой стороны – фотодиод (приёмник светового луча) 3. В зависимости от углового положения диска в цепи фотодиода появится ток только в том случае, если он будет находиться против светлой полосы, через которую пройдёт луч от соответствующего светодиода. Таким образом, на выходных контактах датчика будет сформирован двоичный код углового положения диска.

Для систем без обратной связи (с шаговыми двигателями) важно иметь начальную точку отсчёта обобщённой координаты. Для этого используют: путевые микровыключатели, герконы (герметичные контакты).

Датчики аварийной блокировки предназначены для предохранения работающего и технологического оборудования от поломок, а также для аварийного отключения работающего оборудования в случае проникновения в его рабочую зону человека или другого постороннего объекта.

Исходя из опыта эксплуатации промышленных роботов, основными видами сбоев в их работе являются:

- отдельные степени подвижности доходят до своих кинематических ограничений;
- захват «натывается» на отдельные элементы оборудования или на деталь.

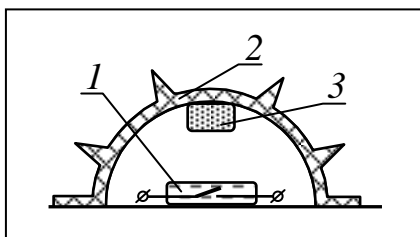


Рис. 7.11 Датчик касания

В первом случае достаточно поставить на звенья конечные микровыключатели, а во втором – смонтировать снаружи схвата либо тактильный датчик, либо датчик касания (рис. 7.11). Контакты геркона 1 замкнутся при деформации резинового кожуха 2 и приближении к геркону магнита 3.

С целью защиты от проникновения в рабочую зону промышленного используют датчики дальней локации, помосты с конечными микровыключателями, барьеры и заградительные сетки с такими же микровыключателями.

7.4 Алгоритмы управления адаптивным роботом

Очувствление роботов позволяет значительно расширить их функциональные возможности и сферу применения. При этом адаптация робота может быть реализована различными способами. Самый простой заключается в реализации модульного принципа. В соответствии с этим принципом для каждой комбинации сигналов с сенсоров имеется специальный модуль, который осуществляет необходимые корректирующие движения. Этот способ применим, однако, только для управления роботом, имеющим небольшое число сенсоров.

Другой способ учёта информации с сенсоров – введение штрафных функций в минимизируемую целевую функцию. Например, для оперативного учёта препятствий на пути движения схвата при расчёте обобщённых координат в качестве штрафной функции может быть взята величина, обратнопропорциональная квадрату расстояния от схвата до ограничивающей плоскости. Эта плоскость строится на каждом шаге итерации перпендикулярно оси схвата в соответствии с поступающей информацией с сенсорных устройств.

Таким образом, к целевой функции без ограничений добавляется штрафная функция, которая запрещает движение в направлении ограничивающей плоскости:

$$Q_n = Q + \sum_{i=1}^3 \frac{\mu}{Q_k^2}, \quad (7.1)$$

где μ – коэффициент штрафа.

Наиболее перспективным способом адаптации является метод самообучения. В этом случае система управления строит поведение робота в соответствии с вновь получаемой информацией и предыдущим опытом.

В настоящее время наиболее приемлемым способом реализации алгоритмов управления является эвристическое программирование. При этом для требуемой операции определяются действия, которые должен совершить робот при заданных условиях функционирования и корректирующие действия, учитывающие изменения этих условий в соответствии с информацией, поступающей с сенсорных устройств.

Таким образом, программа функционирования робота состоит из *основной* и *корректирующей* частей.

В качестве примера рассмотрим программирование операции соединения деталей типа «вал-втулка». Кстати, такого типа соединения составляют около 40% от всех соединений.

Выполнение этой операции будет выполняться в следующей последовательности:

- рассчитать траекторию движения и ориентацию схвата в пространстве для *обеспечения относительной ориентации* сопрягаемых деталей;
- пересчитать траекторию из декартовых координат в систему обобщённых координат робота (решить обратную задачу кинематики о положениях);
- отработать расчётную траекторию;
- рассчитать траекторию движения схвата *для сопряжения деталей*;
- пересчитать эту траекторию в систему обобщённых координат робота;
- отработать эту расчётную траекторию.

Взаимная ориентация собираемых деталей может быть двух типов:

- *безотносительная* ориентация, когда каждая деталь приводится в устойчивое положение относительно абсолютной системы координат;
- *относительная* ориентация, когда детали приводятся в устойчивое положение относительно друг друга.

Безотносительная ориентация требует высокой точности позиционирования каждой детали в пространстве. Поэтому более предпочтительным видом ориентации при сборке является разновидность относительной ориентации, при которой одна из деталей остаётся неподвижной, а другая относительно её ориентируется.

Точность цилиндрического сопряжения деталей типа «вал-втулка» характеризуется тремя факторами:

- точностью совпадения осей δ ;
- точностью углового положения в осевом сечении γ ;
- точностью относительного расположения вдоль оси.

Для обеспечения собираемости такого соединения необходимо, чтобы смещение деталей не превышало (рис. 7.12):

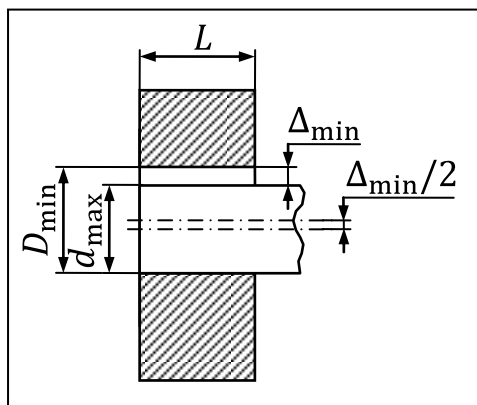


Рис. 7.12 Сопряжение «вал-втулка»

$$\delta = \frac{\Delta_{\min}}{2} = \frac{D_{\min} - d_{\max}}{2},$$

а угол перекоса был бы не более:

$$\gamma = \arctg \frac{\Delta_{\min}}{L}.$$

Для промышленного робота приведённые требования могут оказаться чрезвычайно жёсткими. Их можно снизить следующими способами:

- применением технологических и конструктивных приёмов, такими как: а) использование направляющих и фиксирующих элементов, б) использование реактивных сил, возникающих при соединении с перекосом, в) сопряжение деталей по фаскам, г) ударно-вибрационный режим соединения и т.д.;
- применением поисковых движений;
- оучувствлением робота (визуальная обратная связь, обратная связь по усилиям).

Применение нескольких перечисленных методов позволяет дополнительно повысить надёжность и скорость выполнения операций.

Рассмотрим в качестве примера операцию соединения вала с втулкой роботом, имеющим обратную связь по усилиям. При этом целесообразно использовать *метод поисковых движений*, суть которого заключается в следующем. Одна из деталей должна

перемещаться относительно другой в плоскости, перпендикулярной оси узла. Детали поджимаются друг к другу с некоторым усилием. При совпадении сопрягаемых контуров происходит резкое уменьшение усилия поджатия, что служит сигналом для системы управления о том, что произошло сопряжение деталей. Схват далее должен обеспечить перемещение подвижной детали вдоль оси на заданное значение. Для коррекции ориентации подвижной детали необходимо использовать информацию с датчиков усилий схвата.

Поисковые движения могут осуществляться по различным траекториям: построчным, пилообразным, круговым или спиральным. Спиральная форма траектории поиска позволяет производить поиск практически в любом районе относительно данной точки. На рис. 7.13 представлена блок-схема алгоритма соединения деталей типа «вал-втулка методом поисковых движений».

На блок-схеме выделена стандартная корректирующая операция «Изменение ориентации схвата». Подобные корректирующие операции целесообразно оформить в стандартном виде (по типу стандартных подпрограмм математического обеспечения компьютера) – в виде директив. Обращение к подпрограммам осуществляется по имени директивы.

Основная задача корректирующей подпрограммы – изменение ориентации детали таким образом, чтобы минимизировать возникающие при сопряжении деталей усилия. Измерители усилий могут выдавать скалярное или векторное значение сил на схвате. В первом случае достаточно однокомпонентного датчика сил, во втором – обязателен шестикомпонентный датчик. При использовании однокомпонентного датчика, коррекция положения схвата с деталью может производиться только с помощью поисковых движений (не путать с поисковыми движениями основной программы). Для этого надо обеспечить малые поступательные движения схвата с деталью с одновременным изменением его ориентации. По изменению значения усилия производится коррекция ориентации схвата на следующем шаге движения. Уменьшение усилия происходит последовательным изменением ориентации схвата во взаимно перпендикулярных

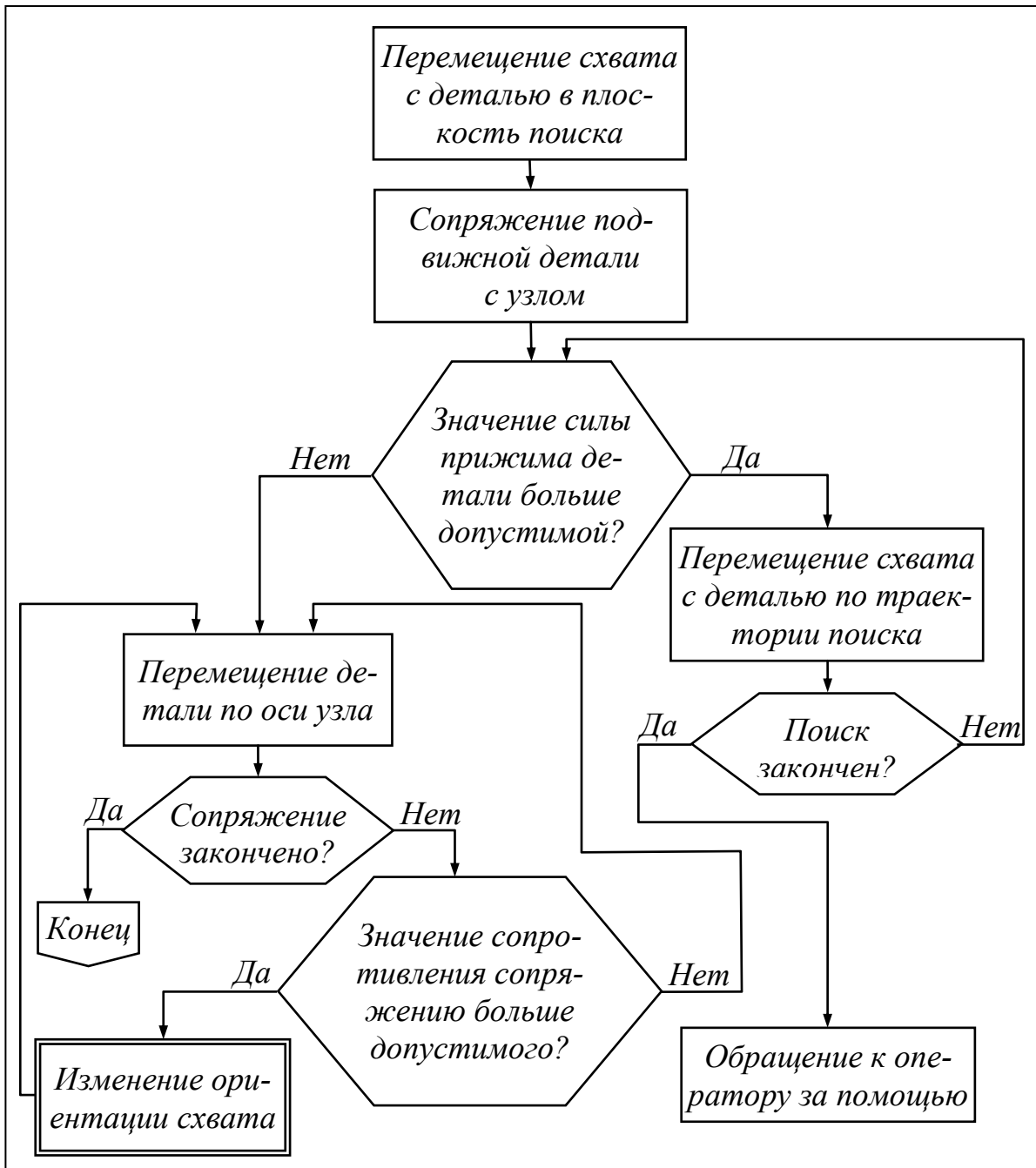


Рис. 7.13 Блок-схема алгоритма сборки узла «вал-втулка»

плоскостях движения. После достижения минимального усилия управление передаётся снова в основную программу.

Таким образом, для коррекции действий робота необходимо:

- 1) определить значение усилия, препятствующего соединению;
- 2) изменить ориентацию схвата с небольшим поступательным перемещением;
- 3) пересчитать требуемые перемещения схвата в обобщённые координаты робота;

4) произвести отработку рассчитанных перемещений.

Блок-схема алгоритма выполнения описанной корректирующей операции показана на рис. 7.14. Для организации ветвления подпрограммы в зависимости от показаний измерителя усилий использованы признаки: ПР1 – признак изменения ориентации схвата в одной плоскости, ПР2 – признак изменения ориентации схвата в другой (ортогональной) плоскости, ПР3 – признак увеличения угла наклона схвата в одной плоскости.

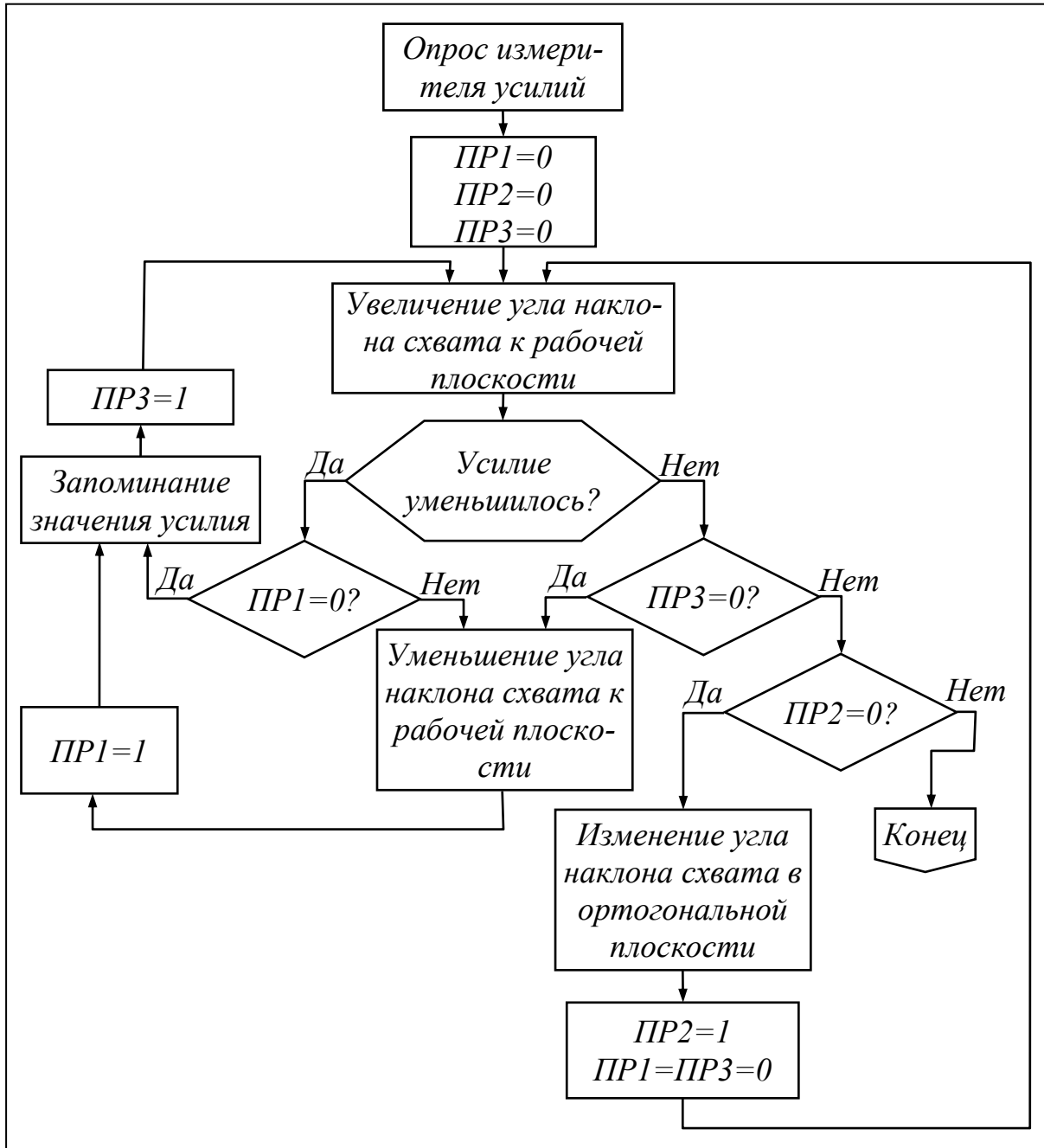


Рис. 7.14 Блок-схема алгоритма корректирующей операции

При использовании шестикомпонентного датчика усилий, действующих на схват, процесс коррекции существенно ускоряется. По значению усилий определяется изменение параметров движения схвата. Блок-схема алгоритма коррекции схвата для операции соединения при использовании векторной величины усилия представлена на рис. 7.15.

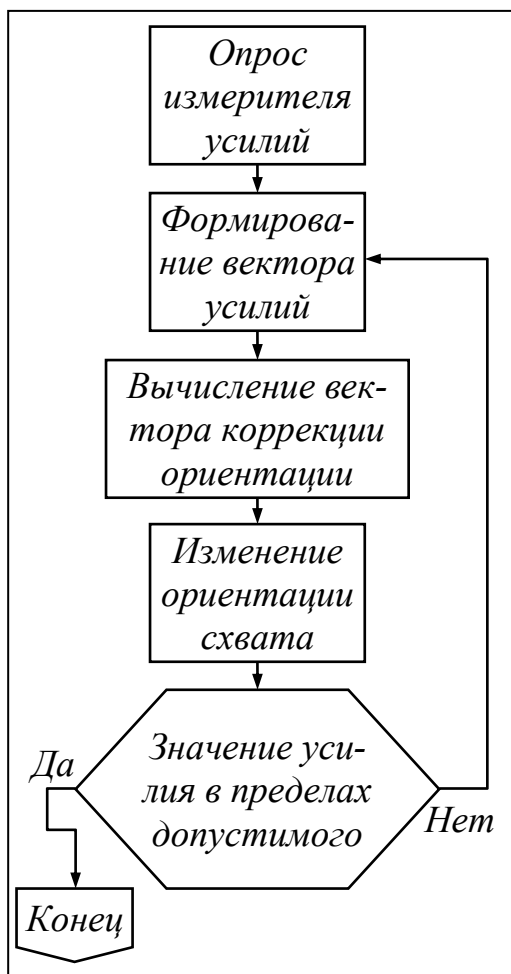


Рис. 7.15 Блок-схема алгоритма корректирующей операции с использованием шестикомпонентного датчика сил

Рассмотренный пример выполнения операции сборки соединения типа «вал-втулка» характеризует типовой процесс функционирования адаптивного робота. Подобным же образом будут выполняться операции:

- навинчивания гайки на болт (требуется предварительное «наживление» гайки);
- взятия произвольно расположенного или перемещающегося объекта (требуется автоматическое наведение схвата на объект);
- дуговой сварки швов, положение которых может варьироваться (требуется вести сварочную головку строго по шву и с

определённой угловой ориентацией) и т.п.

Для выполнения подобных операций требуется оперативно получать информацию о внешней среде непосредственно в ходе их выполнения. Необходимым условием выполнения является наличие сенсорных систем. Чем богаче и совершеннее система «очувствления» робота, тем быстрее, проще и точнее будет выполняться требуемая операция.

7.5 Интеллектуальные системы управления

Интеллектуальное управление – высшая ступень управления в теории автоматического управления после программного и адаптивного. Чёткого понятия «искусственный интеллект» пока ещё не существует. По-видимому, термин «искусственный интеллект» необходимо рассматривать как общее понятие процессов и явлений, содержащих возможность технической реализации некоторых интеллектуальных способностей человека.

Современные представления о проблематике и исследованиях в области искусственного интеллекта были сформулированы в США в 1956 году. В дальнейшем эти исследования велись в рамках единого направления с робототехническими исследованиями.

В настоящее время ни у кого не вызывает сомнения, что в понятие «искусственный интеллект» входят проблемы:

- запоминания информации;
- построения выводов и принятия решения;
- обучения;
- распознавания образов;
- распознавания человеческой речи и т.д.

Прогресс искусственного интеллекта неизменно связан с созданием компьютеров, обладающих интеллектуальными способностями человека. Кстати, первая проблема уже решена в рамках информатики и вычислительной техники.

Применительно к робототехнике можно считать, что развитие искусственного интеллекта ориентировано на развитие и повышение эффективности систем управления роботом. А точнее – реализации их функционирования на высших уровнях иерархической структуры (чтобы программировать на уровне «что сделать», а не «как сделать»).

Построение выводов и принятие решения в рамках классической логики выполняется тремя путями: *дедукцией*, *индукцией* и *абдукцией*. Из них только дедукция выводится в рамках строгой логики (категорический силлогизм). Индукция и абдукция не являются категорическими и поэтому называются вероятностными силлогизмами.

Для иллюстрации этих силлогизмов рассмотрим простой пример. Выдвинем очевидную большую посылку, что *рыба – живое существо, умеющее плавать*. Малая, тоже очевидная, посылка: *карась – рыба*. На основании этих посылок делаем заключение: *карась – живое существо, умеющее плавать*. Это пример дедукции. Дедукция – это вывод, позволяющий получить заключение из большой и малой посылок. Большую посылку называют *дедуктивным правилом*, а малую посылку – *фактическим заявлением (декларацией)*.

Реализуемые в настоящее время вычислительными средствами и методами выводы – это выводы *дедуктивные*. Если большая и малая посылки истинны, то и заключение является истинным.

Индукция – это получение большой посылки из заключения и малой посылки. Можно ли считать истиной, что рыба – живое существо, умеющее плавать, исходя из того, что карась – рыба и он умеет плавать? Конечно, нет. Могут быть и другие виды рыб, передвигающиеся по суше (нам не известные). Правда по мере накопления знаний путём натуральных наблюдений, повышается достоверность большой посылки. Следовательно, способность к индуктивному выводу сопоставима со *способностью к обучению*.

Абдукция – получение малой посылки из заключения и большой посылки. Например, на основе факта, что некоторые живые существа умеют плавать, делается умозаключение о том, что это живое существо – рыба. Однако существует много водоплавающих животных, которые не являются рыбами (киты, котика, тюлени). Следовательно, такой вывод нельзя считать безусловно достоверным. На рис. 7.16 показана схема получения умозаключений посредством силлогизмов.

Человек в повседневной жизни постоянно имеет дело с подобного рода нечёткими, вероятностными оценками. Эти вероятностные выводы и умозаключения (индукция и абдукция) характерны для поведения человека в частично неопределённой, неупорядоченной среде.

Принятием решения называется решение проблемы путём поиска и дедукции. Робот с высоким уровнем интеллекта работает по обобщённому заданию от человека или системы более высокого уровня. Интеллектуальные возможности такого робота

должны обеспечить разбиение полученной задачи на подзадачи и выбор алгоритма выполнения каждой из этих подзадач. Таким образом, принятие решения – это выбор алгоритма осуществления роботом решения подзадачи. А наиболее продуктивной про-

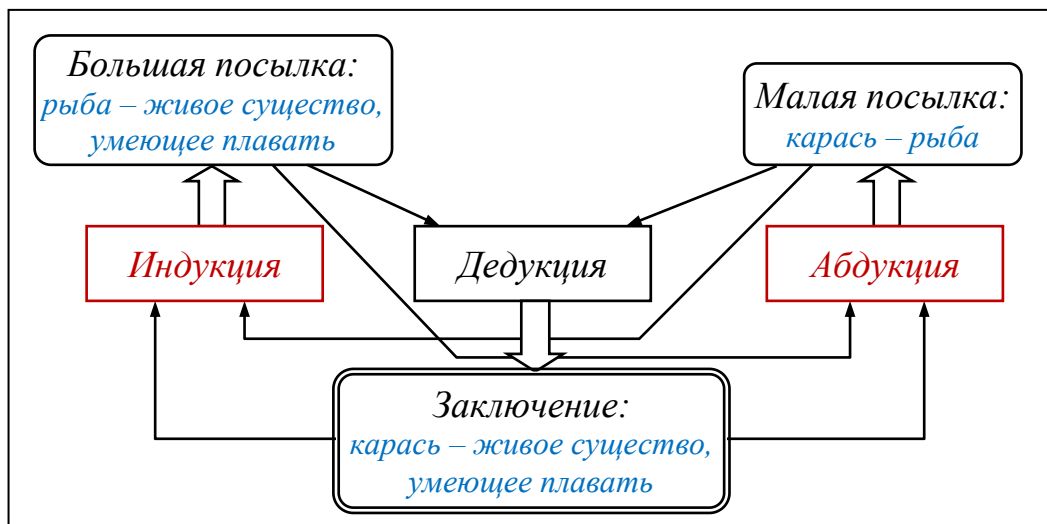


Рис. 7.16 Схема получения умозаключений посредством силлогизмов

цедурой принятия решения является дедуктивный вывод (категорический силлогизм). Но, как известно, для обеспечения дедуктивного заключения необходимы данные двух типов: большие посылки (дедуктивные правила) и малые посылки (декларации). Упорядоченные множества таких данных называются *базами данных*. Они должны быть достаточно представительными.

На первый взгляд может показаться, что дедуктивные правила – это тоже, что и компьютерная программа. Однако это не так. Программа для компьютера задаёт последовательность обработки данных, а дедуктивное правило позволяет детализировать и формализовать разнообразные причинно-следственные связи явлений, процессов и предметов. Следовательно, дедуктивные правила – это знания, необходимые для выполнения алгоритма принятия решения, и они имеют существенно бóльшую значимость для компьютера, чем современные программы.

Все эти знания кодируются не только арифметическими, но и логическими символами. Поэтому возникает необходимость в создании специального языка искусственного интеллекта. Такие языки уже создаются. Так в США разработан и широко используется язык искусственного интеллекта – *LISP*. Язык *PLANNER*

ориентирован на проведение поиска решения методом проб и ошибок. Язык *PROLOG* стал первой законченной разработкой по широкой программе создания компьютера пятого поколения.

Для практического составления программы принятия решения необходимо выполнить *планирование*. Рассмотрим в качестве примера принятия решения способ использования пространства состояний.

Поставим роботу задачу переместить блок с фиксированного положения 2 (рис. 7.17) в нишу 4. При этом схват может совершать только единичные перемещения либо влево, либо вправо. Очевидно, что просто взять схватом блок и переместить его в точку 4 робот не может, так как губкам мешает стена, в которой находится ниша.

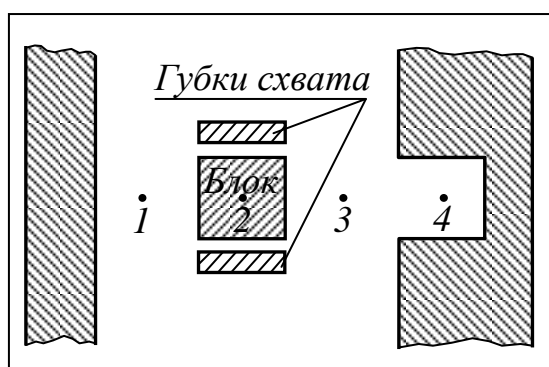


Рис. 7.17 К задаче перемещения блока

Под пространством состояний понимается пространство с квантованными значениями состояния, представленными путём фиксирования возможных сочетаний положения блока и схвата (рис. 7.18). В этом пространстве есть и несуществующие точки, например P и P' . Другие несуществующие точки не показаны. Сплошными линиями показаны возможные переходы из одних точек в другие.

В пространстве состояний имеют место и нереализуемые ситуации. Например, невозможен прямой переход из точки 1 в другие смежные точки (в точки 2).

Одна из возможных процедур переноса блока в пространстве состояний показана пунктиром: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$. Эта последовательность означает, что в точке 2 (рис. 7.17) робот сожмёт губки схвата и зажмёт в них блок, затем перенесёт его в точку 3. В этой точке раскроет схват и переместит его в точку 2. Далее сожмёт губки схвата и толкнёт сжатыми губками блок в нишу, а сам перейдёт в это время в точку 3.

Возможны и другие процедуры переноса, например: $A \rightarrow H \rightarrow Q \rightarrow F \rightarrow G$. Возможны и другие варианты. Многообразие путей предполагает выбор оптимального пути или минимальной стоимости в широком смысле.

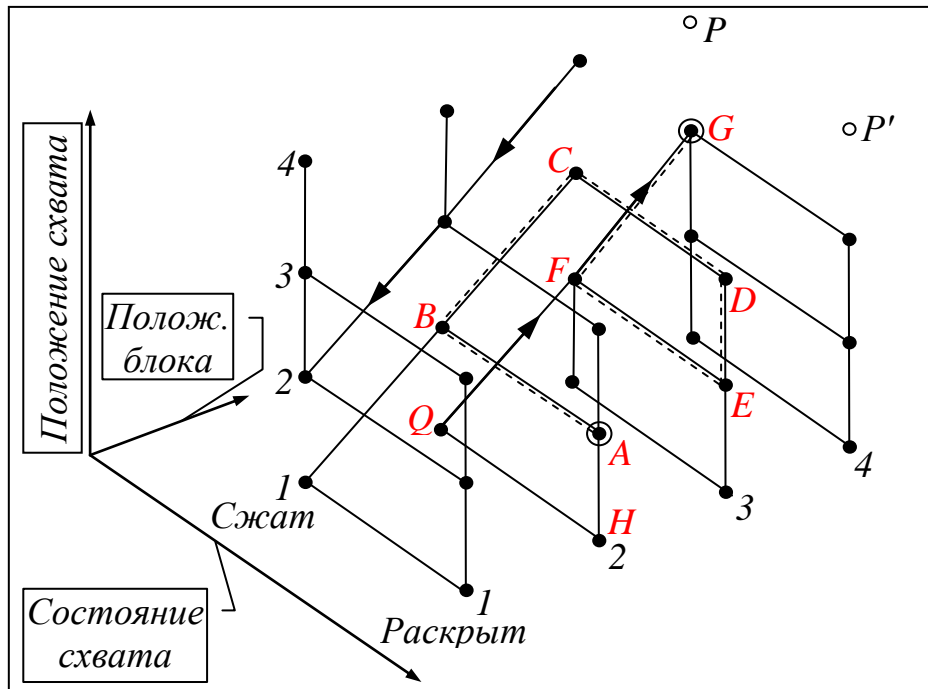


Рис. 7.18 Пространство состояний

Расширение функциональных возможностей робота сопряжено с очень сложной и трудоёмкой разработкой программного обеспечения, необходимого для реализации этих функций. В это связи представляется перспективным наделить робот способностью к обучению и тем самым повысить уровень сложности решаемых задач и расширить его функциональные возможности.

Возможность наделить машину способностью к обучению находится в центре внимания многочисленных исследователей со времени появления ЭВМ. Однако приходится констатировать, что все попытки создать такую машину пока безуспешны. Это в первую очередь связано с недостаточно ясным пониманием способности к обучению высокоорганизованных существ и человека.

В психологии принято следующее понятие обучения. Обучение – это изменение внешнего проявления поведенческой активности, формирующееся на основании определённого опыта. Способность к обучению у человека является врождённой. Следовательно, обучение человека возможно тогда, когда инициируются его генетически заданные способности. В заключении отметим, что индуктивный логический вывод, рассмотренный ранее, является, по существу, операцией вывода некоторого общего правила из множества отдельных фактов, что тоже можно считать одной из форм обучения.

7.6 Контрольные вопросы

- 7.1 Какова структура программы работы промышленного робота?
- 7.2 Назовите два основных метода разработки языков программирования промышленных роботов.
- 7.3 В чём заключается сущность программирования робота методом обучения?
- 7.4 Каков формат команд языка *VAL*?
- 7.5 Как используется метод обучения при программировании на языке *VAL*?
- 7.6 Назовите основные команды языка *VAL*.
- 7.7 Объясните логику выполнения программы разгрузки поддона роботом Пума-560.
- 7.8 В чём заключается сущность и содержание четырёх уровней иерархии систем управления и программирования промышленных роботов?
- 7.9 Зачем необходима адаптивной роботу система сенсорных устройств?
- 7.10 Какие функции выполняет система сенсорных устройств промышленного робота?
- 7.11 Как работают локационные системы осязания роботов?
- 7.12 Каков принцип действия датчиков искусственного осязания?
- 7.13 Как работает шестикомпонентный датчик сил?
- 7.14 Опишите принцип действия и функции датчиков перемещения.
- 7.15 Каков принцип действия кодового датчика?
- 7.16 По какому принципу программируется адаптивный робот?
- 7.17 Как можно снизить требования к точности позиционирования при выполнении сборочных операций?
- 7.18 В чём заключается сущность метода поисковых движений при выполнении роботом сборочной операции?
- 7.19 Какие функции выполняет интеллектуальная система управления?
- 7.20 В чём заключается сущность категорического и вероятностных силлогизмов – дедукции, индукции и абдукции?

8 Технологическое применение промышленных роботов

Задача робототехники наряду с созданием собственно роботов заключается и в создании технических систем и комплексов, основанных на использовании этих роботов. Эффективность автоматизации благодаря применению промышленных роботов может быть достигнута только при комплексном подходе к созданию и внедрению роботов, обрабатывающего оборудования, средств управления, вспомогательных механизмов и устройств. Проводить организационно-технологические мероприятия значительного объёма ради единичного внедрения промышленного робота нерентабельно. Только расширенное применение промышленных роботов в составе сложных роботизированных технологических систем оправдано технически, экономически и социально [11].

Промышленные роботы могут быть эффективно применены в условиях производства с различной серийностью. Так в *массовом* и *крупносерийном производстве*, благодаря возрастающим требованиям прогресса и модернизации, требуется сравнительное частое изменение конструкций и потребительских свойств выпускаемых изделий, что, в свою очередь, вызывает необходимость в переналадке или изменении структуры автоматической линии, замене оборудования и средств автоматизации. Таким образом, срок эксплуатации жёсткой автоматической линии сокращается. Это вызывает необходимость широкого применения промышленных роботов в массовом и крупносерийном производстве.

Серийное производство характеризуется ограниченным сроком морального старения выпускаемых изделий. В этих условиях целесообразно применение агрегатных станков и станков с ЧПУ, которые с помощью роботов можно объединить в автоматические линии с гибкой связью.

В *мелкосерийном* производстве, где требуются переналадки во время смены, эффективно применение промышленных роботов в составе РТК и многооперационных станков с ЧПУ.

8.1 Этапы роботизации

Серьёзность проблем, возникающих при внедрении роботов, почти всегда недооценивается. Проекты автоматизации имеют сверхъестественную способность следовать закону Мэрфи (если какая-либо неприятность может случиться, то она случается). Однако заблаговременное предвидение неизбежных трудностей автоматизации позволяет принять меры по сведению к минимуму отрицательных последствий.

Опыт внедрения роботов показывает, что существуют пять стадий осуществления проекта роботизации (рис. 8.1). На каждом

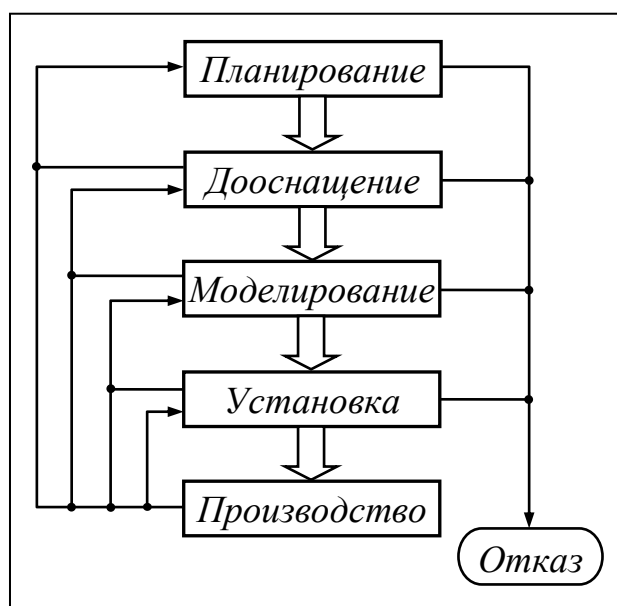


Рис. 8.1 Стадии роботизации

уровне рассматриваются альтернативы вернуться к предыдущей стадии или отказаться от проекта. Попытки пропустить одну или несколько стадий, показанных на диаграмме, неизбежно заканчиваются неудачей, и приходится возвращаться по цепочке назад. Практически невозможно успешно пропустить какую-либо стадию и при этом получить удовлетворительные результаты от внедрения [10].

Планирование включает, в первую очередь, выбор потенциального объекта роботизации. При этом оценивают как техническую возможность роботизации, так и её социально-экономическую эффективность. Предложения с отрицательными результатами исключают из перечня вариантов по роботизации, кроме предложений по ликвидации рабочих мест с особо тяжёлыми и вредными условиями труда (см. первый закон использования роботов в разделе 1.2).

Анализ технической возможности роботизации включает:

- возможность группировки изделий по конструктивно-технологическим признакам;
- схемы размещения оборудования;

- возможность установки датчиков и организации каналов связи;

- способы обработки и контроля качества изделий.

При этом существуют условия, облегчающие роботизацию:

- малооперационные технологии;
- многократное повторение одинаковых рабочих циклов;
- фиксированная траектория перемещения деталей;
- фиксированные начальные и конечные точки перемещения;
- согласование циклов роботизируемого и смежных процессов во времени;
- постоянная ориентация и форма объектов манипулирования.

Оценка социально-экономической эффективности должна включать:

- выявление вредных и опасных факторов на рабочих местах;
- расчёт потерь при условии работы в неблагоприятных условиях;
- расчёт доплат за тяжёлые условия труда, дополнительный отпуск, сокращённый рабочий день, льготное пенсионное обеспечение, расходы по обеспечению безопасности, потери, связанные с травматизмом.

На рис. 8.2 приведена структурная схема стадии планирования. После *выбора объекта роботизации* важным этапом является *определение целей автоматизации* с точки зрения полезности и, в первую очередь, экономической эффективности. Экономический эффект может быть получен за счёт:

- повышения производительности труда и увеличения выпуска продукции;
- сокращения трудоёмкости работ устранением организационных и технологических потерь;
- повышения качества изделий стабилизацией рабочих операций;
- улучшения условий работы посредством вывода рабочих из мест с вредными для здоровья факторами;
- повышения безопасности труда выводом рабочих из опасных рабочих зон.

Для стоимостной оценки факторов улучшения условий работы и повышения безопасности труда используют расчёты социальных составляющих стоимости рабочей силы – потери от

временной нетрудоспособности, нехватки и текучести кадров, внутрисменного отдыха, затраты на охрану труда и технику безопасности, содержание столовых, медсанчастей. Все эти расходы примерно равны расходам на основную заработную плату.

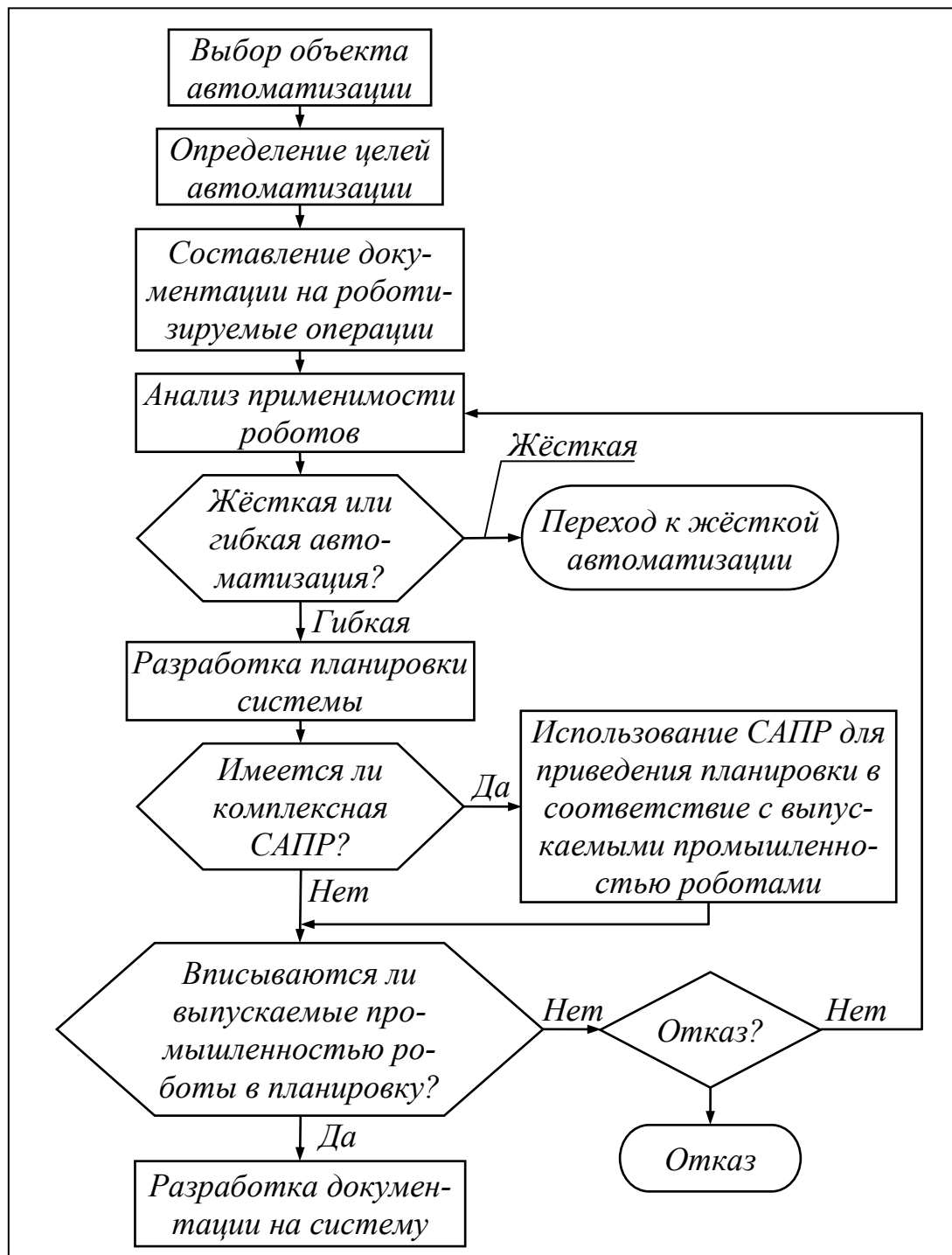


Рис. 8.2 Структурная схема стадии планирования

Составление документации на роботизируемые операции полезно как при детальной разработке предлагаемой автоматизированной системы, так и для её окончательной оценки. Сюда

входит представление существующего технологического процесса в виде схемы-графа, где рассматриваются варианты устранения, совмещения и улучшения отдельных операций, возможность выполнения некоторых операций роботом.

В документацию должны быть также занесены планировки, длительность циклов работы оборудования, продолжительность операций, выполняемых вручную, данные, характеризующие производительность и качество. Детальное изучение операций, требующееся для составления подробной документации, обычно позволяет выявить пути их некоторого усовершенствования ещё до установки роботов.

Анализ применимости роботов включает изучение технических характеристик промышленно выпускаемых роботов, чтобы определить, подходят ли они для выполнения данного типа работ. Упор здесь следует делать на техническую сторону, а не на экономическую целесообразность. В качестве предпосылки к принятию следующего решения – о выборе между жёсткой и гибкой автоматизацией – имеет смысл в самом общем виде рассмотреть и экономические вопросы.

На этапе *выбора между жёсткой и гибкой автоматизацией* необходимо тщательно проанализировать альтернативы применению роботов. Робот с его универсальностью и перепрограммируемой системой управления обеспечивает наибольшую гибкость, однако иногда при повышенной стоимости.

Выше отмечалось, что роботы целесообразно применять не в крупносерийном, а в серийном производстве. Скорость выполнения операций может служить важным критерием при принятии решения о типе автоматизации. Кроме собственно скорости, следует принимать во внимание возможность совмещения операций. Хотя робот может быть оснащён двойными захватами, а его система управления может выдавать команды на срабатывание других устройств, сами роботы являются однофункциональными устройствами. Поэтому жёсткая автоматизация часто оказывается лучше там, где целые комплексы одновременно выполняемых операций находятся под непосредственным управлением одного контроллера.

Сделав выбор между промышленным роботом и жёсткой автоматизацией, можно перейти к следующему этапу: разрабо-

тать планировку предполагаемой автоматизированной системы, включая роботы, конвейеры, устройства подачи деталей, технологическое оборудование, с которым роботы будут взаимодействовать.

8.2 Планировка роботизированных технологических комплексов

Разработка планировки роботизированных технологических комплексов (РТК) является итерационным процессом, при котором пробный вариант планировки сначала сравнивается с характеристиками и размерами рабочего пространства выпускаемых роботов. Затем, если этот вариант не проходит, для проведения сравнения подготавливается новый вариант. Процесс итерации показан на рис. 8.2.

Робот будет работать в трёхмерном пространстве, и все размеры должны быть взаимоувязанными. В связи с этим, целесообразно разрабатывать планировку с использованием САПР, включающей 3D моделирование. Для укомплектования документации предполагаемого РТК надо тщательно определить значения грузоподъёмности, длительности операций и траектории звеньев робота. Эти характеристики могут быть позже изменены для приведения в соответствие с конкретной конструкцией робота, но знание основных характеристик может оказаться очень полезным в стадии дооснащения. Эта стадия следует после стадии планирования.

Промышленные роботы в составе РТК могут выполнять следующие операции:

- основные технологические операции, такие как сварка, окраска, сборка;
- установка заготовок в рабочую зону станка и снятие готовых деталей со станка;
- контроль базирования заготовок при их установке;
- размещение этих деталей в таре;
- передача деталей от станка к станку;
- поворот деталей в процессе обработки;
- контроль размеров и очистка поверхностей деталей;
- смена инструмента.

К металлорежущему оборудованию в составе РТК предъявляются следующие требования:

- автоматический зажим деталей, их базирование и освобождение;
- механизированное удаление стружки;
- автоматический контроль параметров детали;
- автоматическая смена инструмента;
- возможность обеспечения связи системы управления станком с системой управления роботом;
- безопасный для человека и беспрепятственный для робота доступ в рабочую зону станка.

Если промышленный робот обслуживает одну технологическую машину, выполняющую одну основную операцию, то такой комплекс называют *технологической ячейкой* [1]. Различают три вида компоновок технологических ячеек (рис. 8.3).

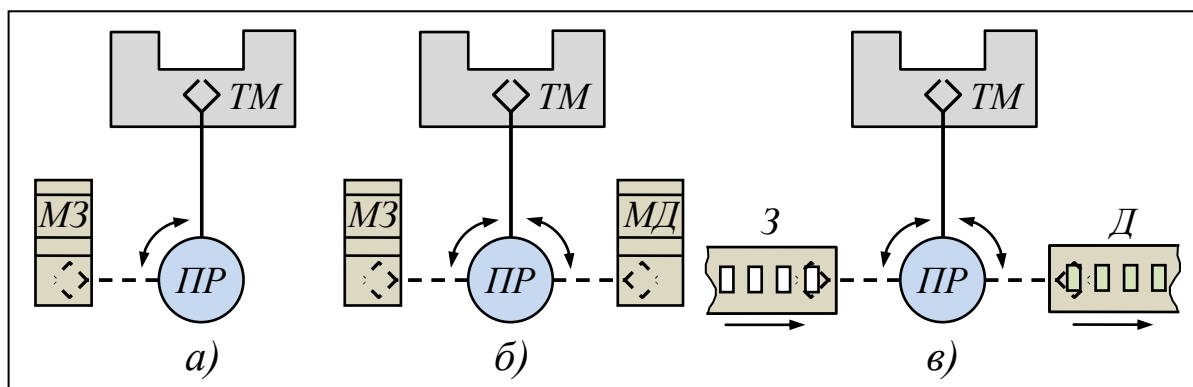


Рис. 8.3 Компоновки технологических ячеек

В первой (рис. 8.3, а) промышленный робот *ПР* только загружает технологическую машину *ТМ* заготовками из магазина *МЗ*. Готовые детали автоматически сбрасываются в тару. Во второй технологической ячейке *б*) тот же робот кроме загрузки технологической машины снимает готовые детали и помещает их в магазин *МД*. Третья технологическая ячейка *в*) оснащена транспортной связью в виде одного конвейера, подающего заготовки и второго – транспортирующего готовые детали.

Представленные компоновки технологических ячеек эффективны в мелкосерийном производстве при автоматизации механической обработки, штамповки, сварки, окраски, когда время обработки одной детали составляет несколько секунд.

Расположенные по прямой технологические ячейки образуют роботизированную технологическую линию. Если в ней отсутствует межоперационная транспортная система, а предметы производства передаются от одной ячейки к другой непосредственно роботом (рис. 8.4), то такие линии просты, однако требуют строго определённого взаимного расположения основного технологического оборудования.

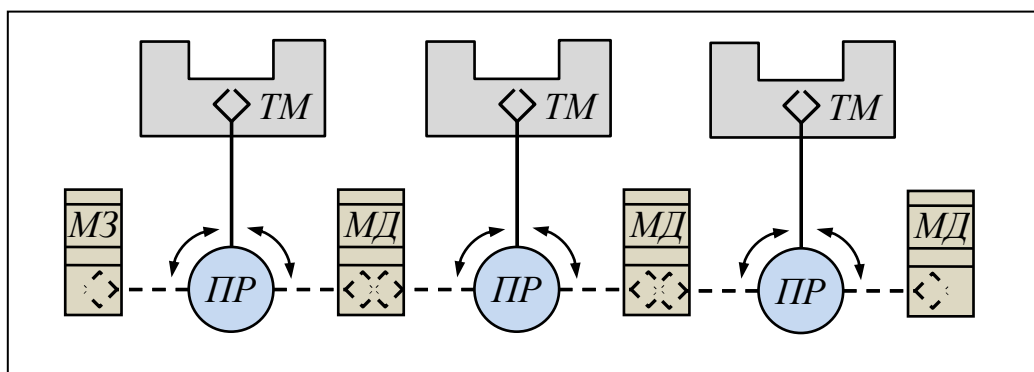


Рис. 8.4 Схема роботизированной технологической линии

Если транспортные связи между ячейками осуществляются с помощью специальных транспортных устройств, как на рис. 8.3, в, то это даёт возможность территориально развязать отдельные ячейки и тем самым облегчить компоновку всего комплекса.

Для технологических процессов с большей, чем несколько секунд, продолжительностью обработки применяют другой тип компоновок РТК с обслуживанием одним роботом нескольких единиц технологического оборудования. На рис. 8.5 показан вариант такого комплекса с круговой компоновкой, в котором один робот обслуживает три технологические машины, расположенные вокруг него.

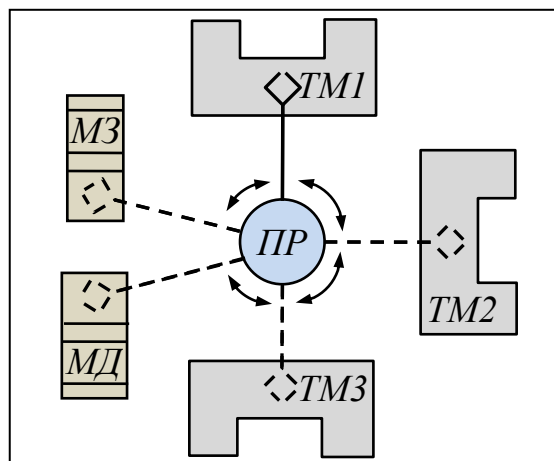


Рис. 8.5 Схема РТК с круговой компоновкой

Часто круговая компоновка используется на операциях сборки, где, в отличие от ранее рассмотренной компоновки, вокруг вращающегося тактового стола $ТС$ располагаются сборочные роботы (рис. 8.6).

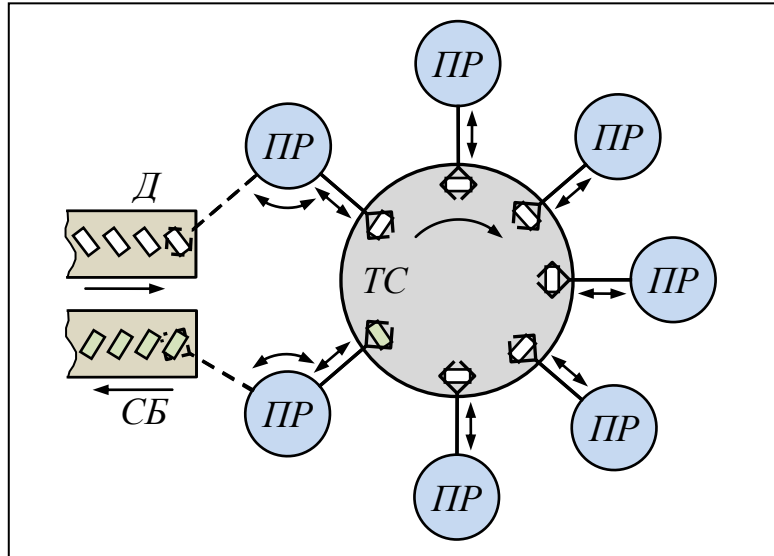


Рис. 8.6 Схема сборочного РТК с круговой компоновкой

На операциях механической обработки с повышенной длительностью используют типовую линейную компоновку, когда один мобильный робот (подвесной или напольный) перемещается по трассе T и обслуживает несколько металлорежущих станков (рис. 8.7).

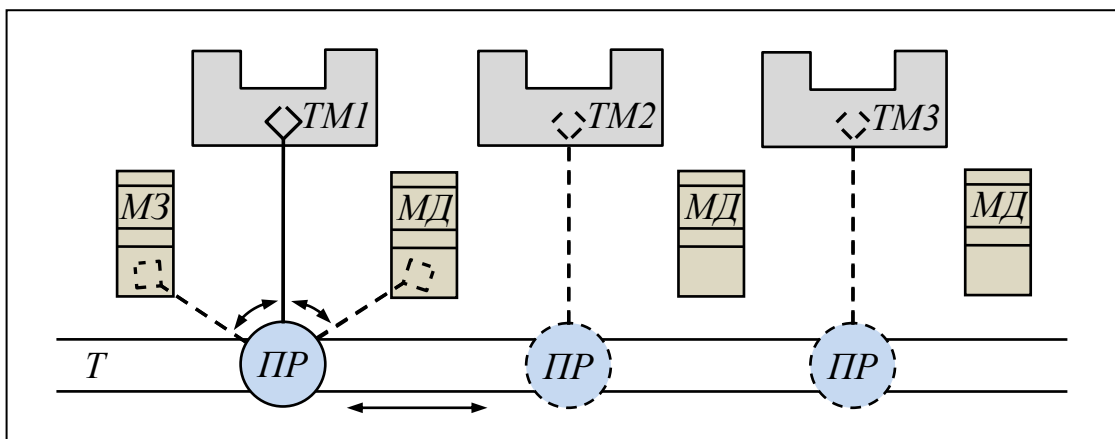


Рис. 8.7 Схема РТК линейной компоновки с одним роботом

Необходимо отметить, что линейные компоновки по сравнению с круговыми позволяют в 1,5 раза уменьшить площадь РТК и увеличить число обслуживаемых станков с 2 – 3 до 5 – 6 и

обеспечивают большую производительность и удобство обслуживания.

На рис. 8.8 показан пример более сложного роботизированного технологического комплекса механической обработки с линейно-круговой компоновкой. Её ещё называют компоновкой по площади. По схеме снизу-вверх можно проследить движение предметов производства [1]. Пунктиром вверху обведён автоматизированный склад с мобильным роботом - штабелёром.

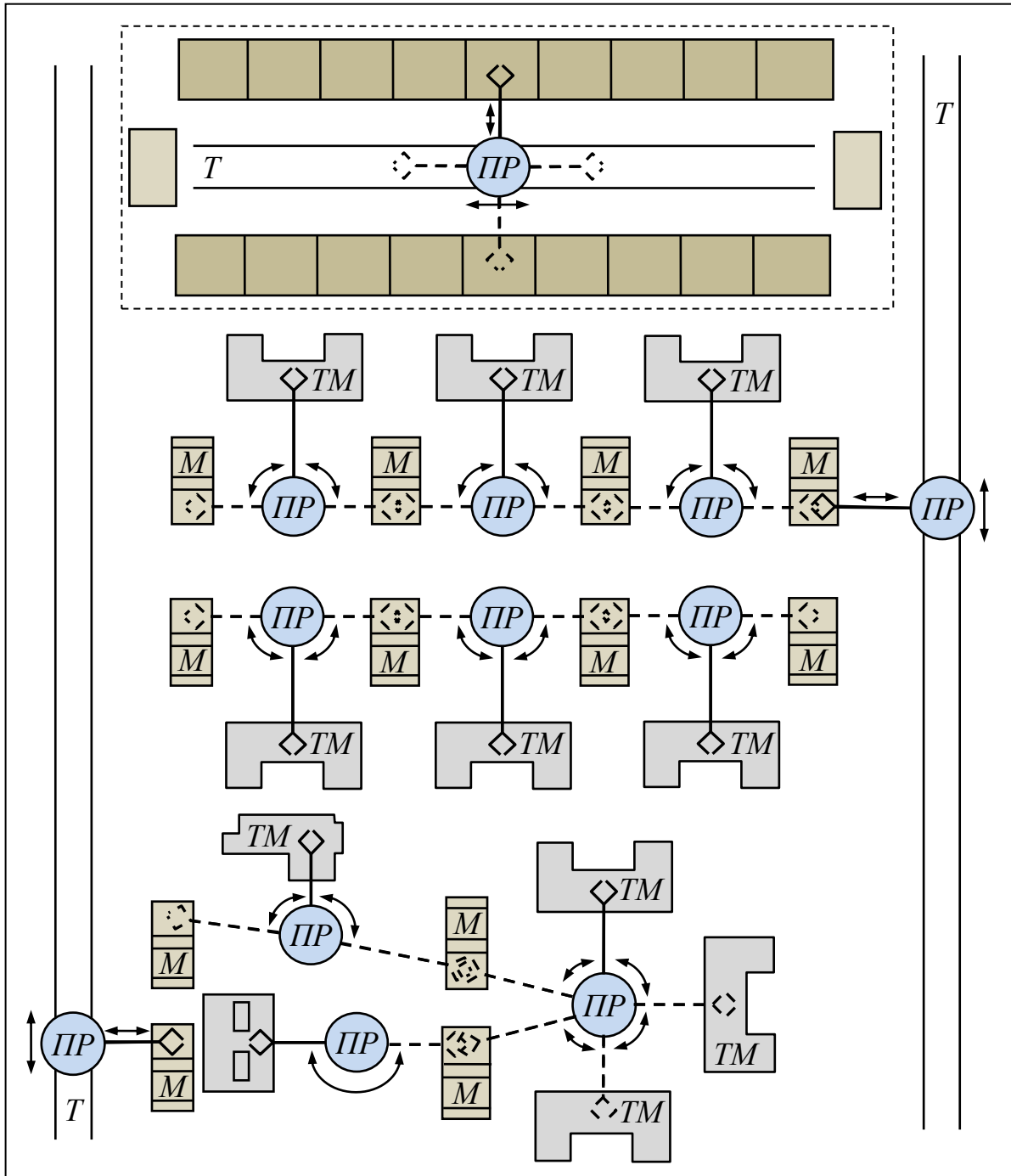


Рис. 8.8 Схема роботизированного участка

8.3 Дооснащение роботизированных технологических комплексов

Применение роботов в производстве требует некоторого дооснащения связанного с ним оборудования. Целью дооснащения является стабилизация связей робота:

- с изделием производства;
- с транспортно-складским оборудованием;
- с технологическим оборудованием.

Самой сложной проблемой дооснащения является разработка захвата. Промышленный робот – это универсальный автомат. Однако это не означает, что он имеет универсальное захватное устройство, успешно функционирующее в любом технологическом процессе. Такого универсального захвата (кроме человеческой руки) просто не существует. Поэтому изготовители роботов поставляют их без захватов и предоставляют тем самым пользователю возможность самостоятельно дооснастить руку. Конструкция захвата может обеспечить успех или погубить проект роботизации, следовательно, важность этого вопроса нельзя недооценивать.

В связи с большим разнообразием объектов манипулирования разработано большое количество типов захватных устройств, основанных на различных принципах действия: механические устройства-схваты, пневматические и электромагнитные. Если робот используется на основной технологической операции, то вместо захватного устройства на руке закрепляется технологический инструмент – краскопульт, сварочная головка, гайковёрт, сварочные клещи и т.п. Рабочие органы могут быть постоянными и съёмными, в том числе с возможностью автоматической замены в ходе выполнения технологического процесса.

Захваты являются наиболее нагруженным элементом манипуляторов и подвергаются сильному износу. Поэтому губки захватов изготавливают из закалённой инструментальной стали. Самые простые двухпальцевые схваты напоминают снабжённые приводом плоскогубцы (рис. 8.9). Губки схвата 1 через систему рычагов 2 сжимаются подвижным штоком 3 пневмоцилиндра 4. В исходное состояние губки возвращаются под действием пружин.

жины 5. Схват имеет возможность поворота по стрелке вокруг продольной оси.

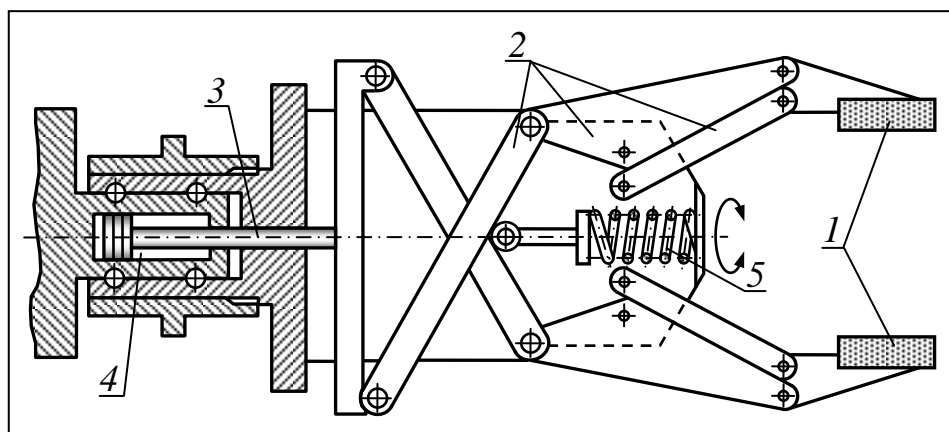


Рис. 8.9 Схват манипулятора

Конструкция изделия и выполняемые с ним манипуляции определяют тип и сложность применяемого захвата. Так, например, захваты наиболее сложных конструкций используются для автоматической сборки. При конструировании захвата следует

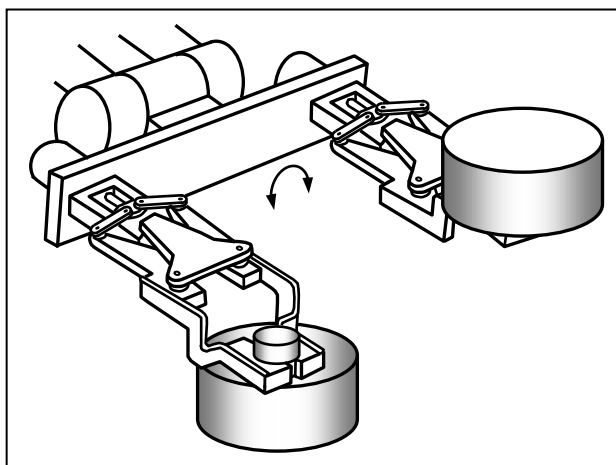


Рис. 8.10 Двойной захват

также рассмотреть возможность использования двойных захватов (рис. 8.10). Такие захваты наиболее эффективны при загрузке и разгрузке станков, когда робот одновременно манипулирует и заготовкой и обработанной деталью. Преимуществом такой стратегии является то, что робот может перемещать детали в

другие места, пока станок производит обработку, вместо того, чтобы бесполезно простаивать перед ним, ожидая завершения цикла.

Эффективным является применение комбинированных захватных устройств, основанных на различных принципах действия. В качестве примера на рис. 8.11 показано комбинированное захватное устройство, состоящее из пневматической присоски 1 и грейферного захвата 2. Такая комбинация позволяет захватывать складированные стопой профильные листы.

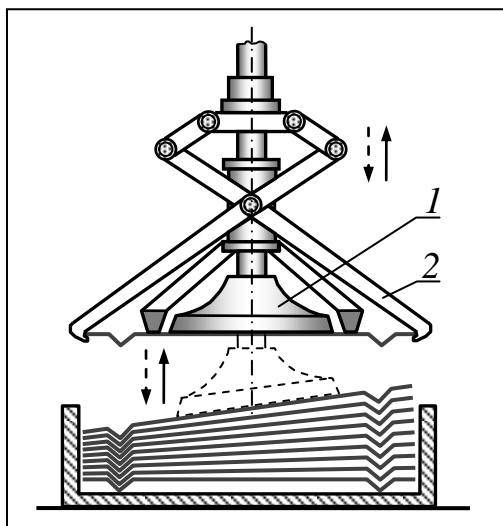


Рис. 8.11 Комбинированное захватное устройство

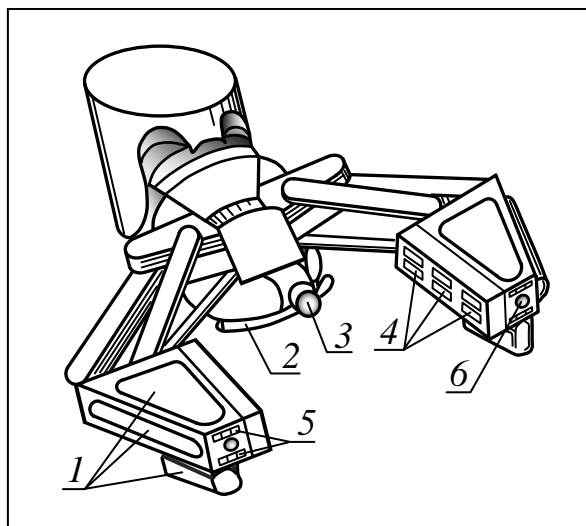


Рис. 8.12 Адаптивное захватное устройство

Захватные устройства адаптивных промышленных роботов оснащают различного типа датчиками, описанными в разделе 7.3 и позволяющими роботу оценивать ситуацию в рабочей зоне. В качестве примера на рис. 8.12 показано адаптивное двухпальцевое захватное устройство [11]. На наружных сторонах его губок установлены шесть тактильных датчиков *1*, построенных на основе герконов. С их помощью фиксируется соприкосновение схвата с внешними объектами. На внутренней поверхности губок, на их концах и на рычаге *2* между губками установлено семнадцать потенциометрических датчиков давления *3*, *4* и *5*. Два фотодиода *6* обеспечивают локацию объекта и наведение на него захватного устройства.

Захватные устройства часто присоединяют к последнему звену манипулятора через промежуточные, податливые конструктивные элементы. С их помощью осуществляется компенсация возможных неточностей позиционирования, и устраняются возникшие при этом механические напряжения в звеньях манипулятора при механической сборке, установке заготовок в зажимы и гнёзда технологического оборудования, перемещении предметов по направляющим и т.п. [1].

Как отмечалось выше, если робот выполняет основную технологическую операцию, то вместо захвата устанавливается технологический инструмент. На рис. 8.13 показана сварочная головка адаптивного робота [12].

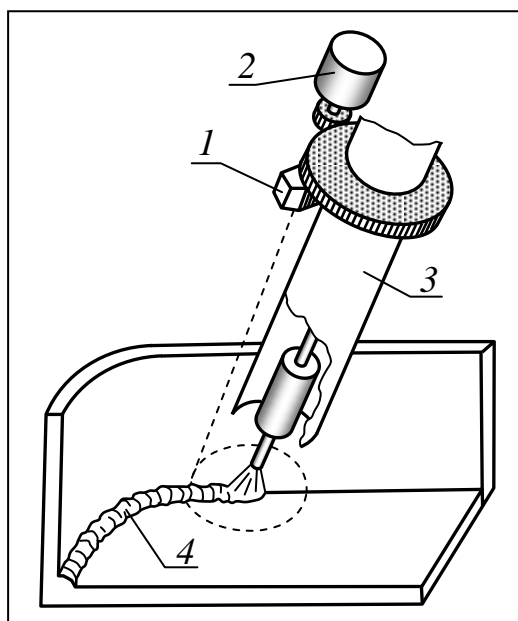


Рис. 8.13 Адаптивная сварочная головка

Для измерения геометрических характеристик линии сварки и самого шва в зоне сварки применён полупроводниковый лазер 1, вращает который электродвигатель 2. По результатам измерения расстояния (за один поворот лазера вокруг горелки 3 снимается около 200 отсчётов) формируется локальная трёхмерная модель свариваемого изделия и шва в зоне сварки. Эта локальная модель, зависящая от текущего положения, вводится в систему управления робота, которая вычисляет необ-

ходимые геометрические и технологические характеристики: зазоры и углы между свариваемыми поверхностями, расстояние между горелкой и базовой поверхностью, ориентацию горелки, форму наплавленного на шве валика и т.п. Полученные характеристики используются для стабилизации оптимального режима сварки.

Другой важной проблемой дооснащения, помимо разработки захватного устройства, является обеспечение стабильности размеров и позиционирования объектов манипулирования. Очевидно, что адаптивные роботы, оснащенные органами технического зрения, способны работать и с неориентированными объектами манипулирования. Однако в большинстве случаев их применение пока экономически нецелесообразно. Большинство роботов и автоматов для перемещения и ориентации работают «вслепую». Поэтому инженеру также полезно закрыть глаза, когда он разрабатывает средства автоматизации и пытается представить, как роботы обращаются с деталями. В связи с этим между роботом и деталями должно находиться вспомогательное оборудование, осуществляющее ориентацию деталей и их позиционирование. К такому оборудованию относятся:

- накопители для хранения заготовок;
- питатели для подачи заготовок в позицию захвата;
- ориентирующие устройства для позиционирования заготовок.

Проектирование оригинального или выбор типового вспомогательного оборудования начинается с анализа технологичности изделия в изготовлении и сборке. При этом не исключается возможность изменения его конструкции. Приведём некоторые простые рекомендации по проектированию деталей с точки зрения автоматизации [10].

Симметрия. В некоторых случаях симметрия деталей способствует автоматизации, а в других – нет. Так на рис. 8.14, *а* ориентация деталей за счёт их симметричности затруднена, а на рис. 8.14, *б* – улучшена.

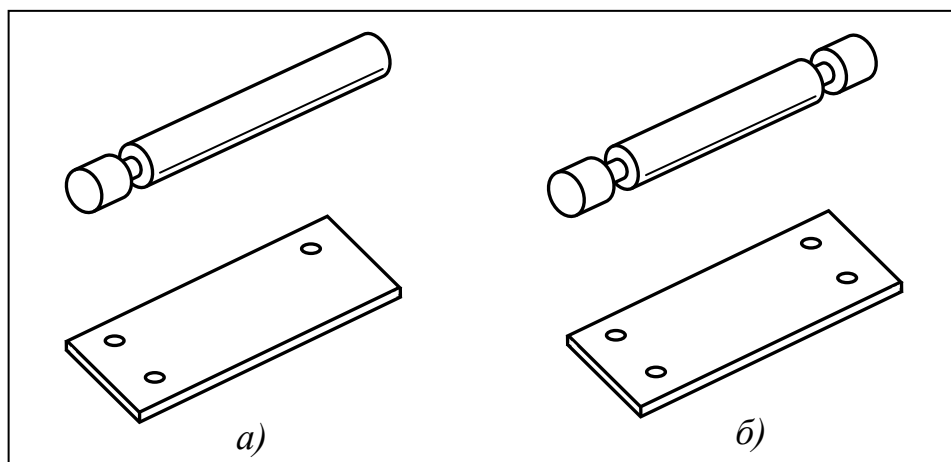


Рис. 8.14 Симметричность деталей

Если конструктивные особенности каждой детали трудно обнаружить механическим способом, то решение проблемы состоит в нарушении симметрии. Например, на рис. 8.15, *а* ориентация деталей за счёт их асимметричности затруднена, то на рис. 8.15, *б* – улучшена.

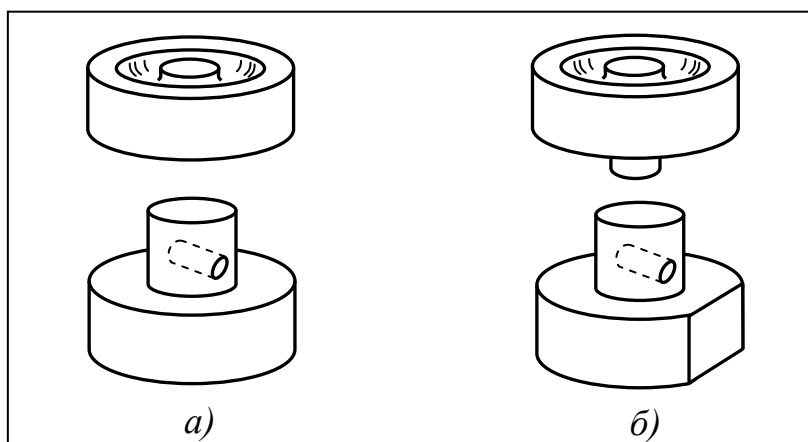


Рис. 8.15 Асимметричность деталей

Взаимное сцепление деталей. Многие детали имеют отверстия и выступы, функционально не связанные друг с другом и не предназначенные для их сопряжения. В таком случае соотношение размеров этих элементов деталей должно исключать возможность попадания выступа в отверстие и сцепления деталей. На рис. 8.16 показаны неудачные *а)* и удачные *б)* конструкции деталей, приводящие к их взаимному сцеплению.

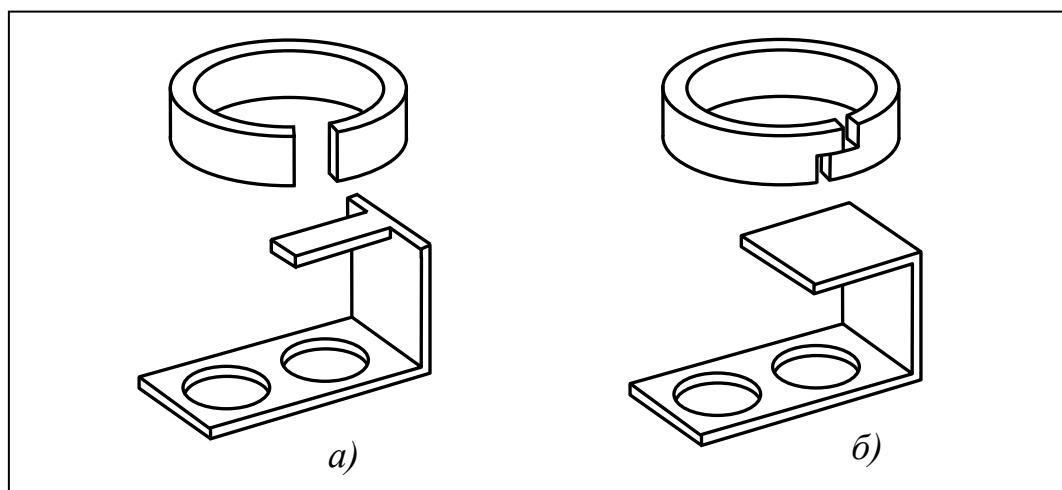


Рис. 8.16 Взаимное сцепление деталей друг с другом

Обеспечение автоматической подачи. Для обеспечения продвижения деталей вперёд по транспортной дорожке используется вибрация или сила тяжести, и усилие передаётся от детали к детали. Но если их кромки имеют скосы, они будут наползать одна на другую (рис. 8.17, *а)*) или заклиниваться на дорожке (рис. 8.17, *б)*).

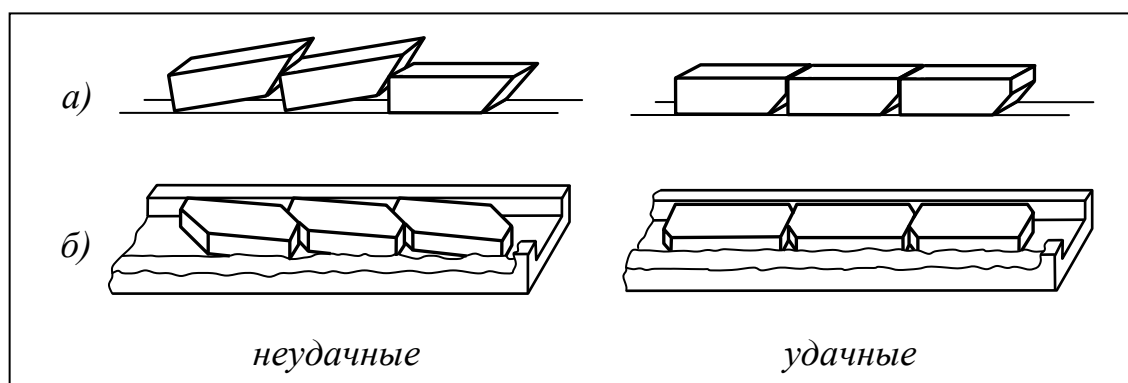


Рис. 8.17 Конструкции, вызывающие заклинивание деталей

Изменению конструкции могут подвергаться детали и узлы с целью их автоматической сборки роботом. Так наличие фасок

на деталях типа вал-втулка является решающим для обеспечения сборки промышленным роботом.

Усложняет процесс сборки наличие большого количества резьбовых крепёжных элементов. Рис. 8.18 является характерным примером того, как использование принципов конструирования узлов с учётом последующей автоматизации их сборки привело к созданию новой конструкции, в которой один винт заменяет сразу четыре.

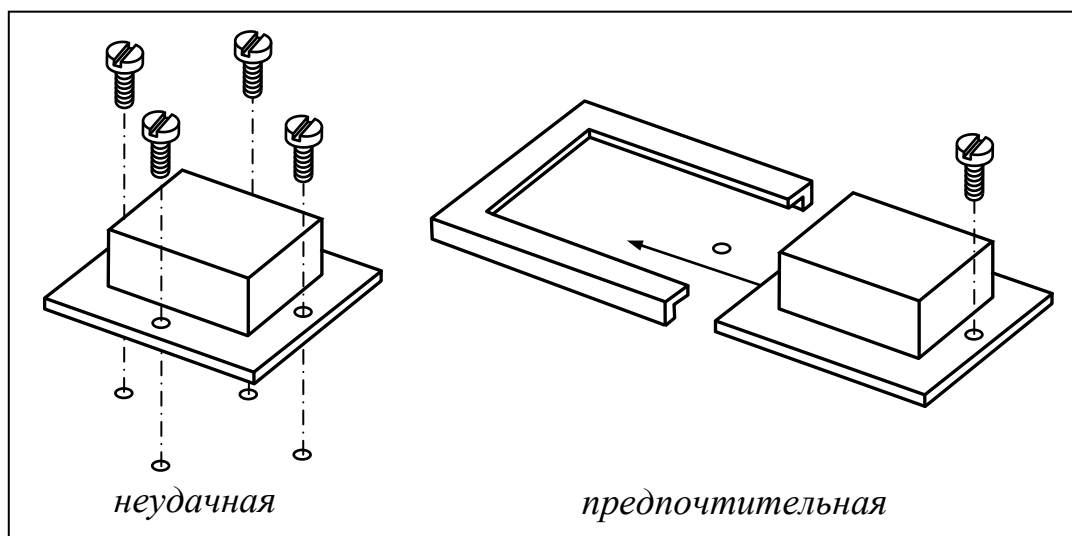


Рис. 8.18 Сокращение винтовых креплений

После детальной проработки конструкции изделия с целью автоматизации изготовления и сборки приступают к выбору или проектированию вспомогательного оборудования. Самым простым его видом являются *накопители для хранения заготовок* (рис. 8.19). В таких накопителях заготовки уже определённым образом ориентированы и доступны захватному устройству промышленного робота.

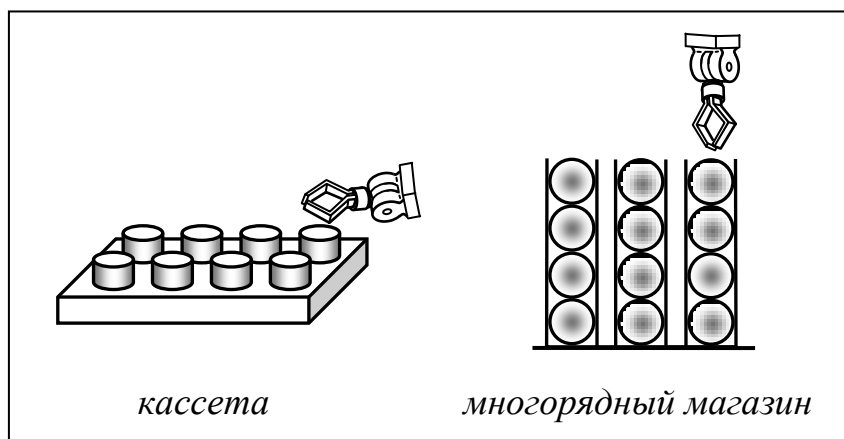


Рис. 8.19 Накопители заготовок

Питатели для подачи заготовок в позицию захвата представляют собой устройства с фиксированным шагом перемещения (рис. 8.20).

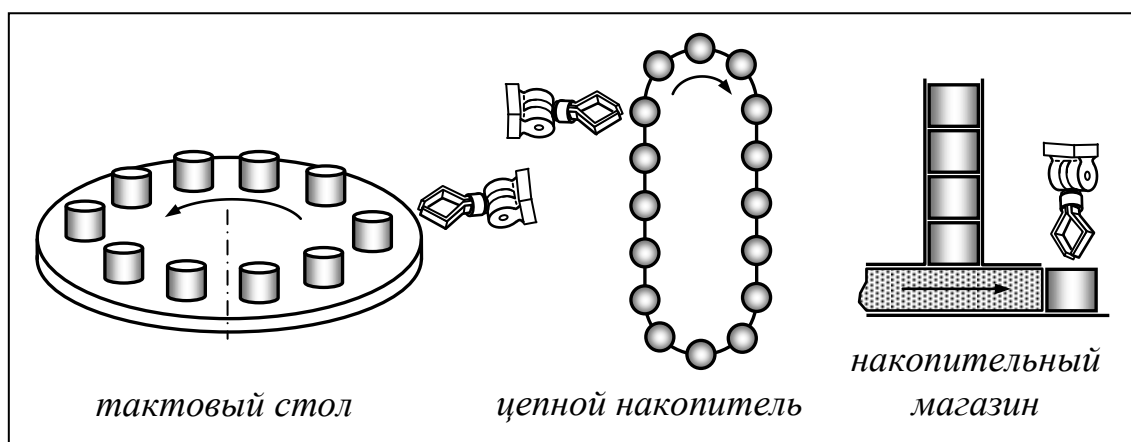


Рис. 8.20 Питатели для подачи заготовок

Накопители-питатели представляют собой лотки с подачей заготовок в позицию захвата робота под действием собственного веса (рис. 8.21).

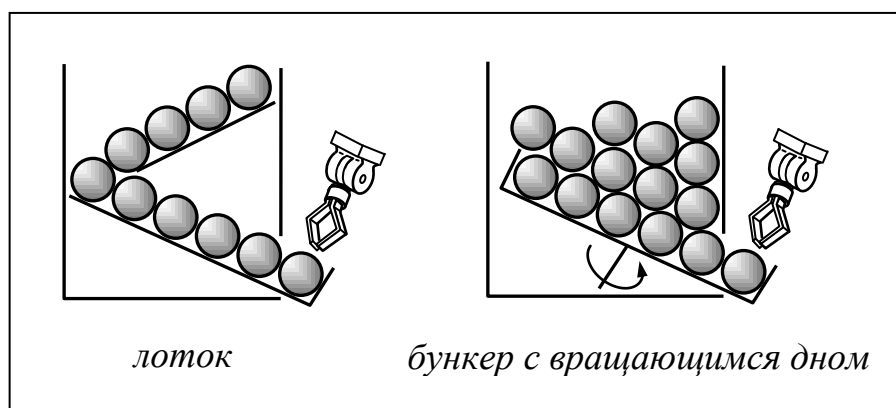


Рис. 8.21 Накопители-питатели

Ориентирующие устройства являются, пожалуй, самыми разнообразными и оригинальными по конструкции устройствами. Без сомнения, возникновение идеи и разработка остроумной конструкции устройства ориентации и подачи деталей являются проявлением таланта конструктора. Самым универсальным подающим и ориентирующим устройством для деталей малого размера является вибробункер. Удивительная особенность этого устройства – способность заставлять вибрирующие детали подниматься вверх по наклонным дорожкам или направляющим, проходящим по спирали внутри бункера, за счёт разницы ускорений во время цикла колебаний. При этом детали забрасываются вверх раньше,

чем они успевают соскальзывать. Одной из принципиальных особенностей вибробункеров является рециркуляция, т.е. возврат деталей к началу дорожки после падения с неё под действием ориентирующего устройства, расположенного вдоль дорожки. На рис. 8.22 представлены примеры таких устройств.

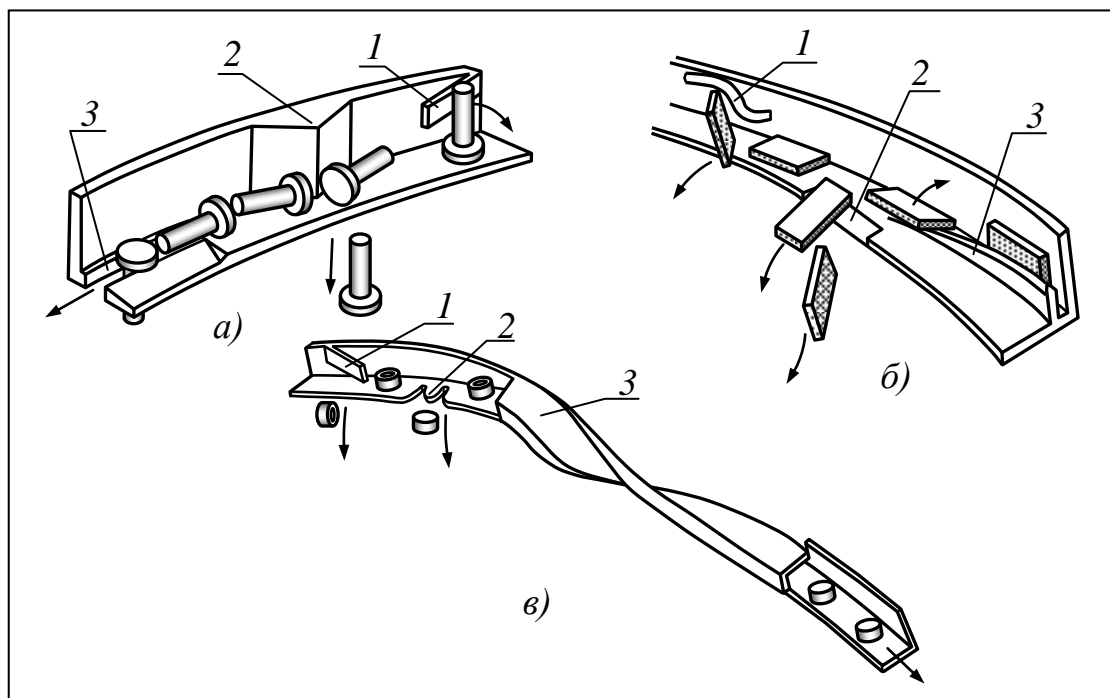


Рис. 8.22 Ориентирующие устройства

Устройство для ориентирования болтов или заклёпок (рис. 8.22, а) включает усик опрокидывателя 1, сбрасывающий все детали, не лежащие на боку, а также отражатель 2, обеспечивающий подачу деталей по одной и отводящий поток, если приёмная щель 3 переполнена.

Детали в форме параллелепипеда ориентируются в лотке вибробункера, как показано на рис. 8.22, б. Выступ 1 лотка сбрасывает стоящие детали, уклон 2 обеспечивает сбрасывание деталей, поступающих в поперечных положениях. Направляющая 3 переводит детали в боковое вертикальное положение.

Устройство, представленное на рис. 8.22, в, ориентирует и подаёт детали в виде колпачков. Усик опрокидывателя 1 сбрасывает детали, лежащие на боку, а специальный зубец 2 сбрасывает все детали, лежащие открытой стороной вниз. Наконечник, закрытая часть дорожки 3 обеспечивает поворот деталей на 180° в требуемое положение.

Таким образом, успех проекта роботизации зависит не только от заметных движений промышленного робота, перемещающего детали, но и от маленьких хитростей позиционирования и ориентации деталей. Иногда этих мелких проблем можно избежать, сохраняя исходную ориентацию во время обработки или с помощью специальной тары в виде кассет и магазинов.

8.4 Особенности применения роботов в машиностроении

Не смотря на непрерывное расширение сферы применения роботов, основной областью их применения по-прежнему остаётся машиностроение и приборостроение. Именно здесь появились первые роботы и в настоящее время сосредоточено до 80% всего мирового парка роботов [1].

Сварочное производство. Начиная с середины восьмидесятых годов прошлого столетия, сварка является основной областью применения промышленных роботов. Здесь сработал первый закон использования роботов, сформулированный Шимоном Нофом (см. раздел 1.2).

Наиболее широко распространена автоматизированная точечная сварка, характерная для автомобилестроения, однако наблюдается рост применения роботов и для дуговой сварки. Точечная сварка наиболее широко применяется на линиях по изготовлению автомобильных кузовов. Поскольку линия находится в постоянном движении, от работающих в её составе роботов для точечной сварки требуется способность автоматически отслеживать движение конвейера. Промышленные роботы для точечной сварки имеют специальную конструкцию, которая предусматривает размещение сварочного трансформатора и токопроводящего кабеля, идущего от него к сварочным клещам. Сварочный трансформатор расположен обычно на манипуляторе для того, чтобы максимально сократить длину кабеля от трансформатора к сварочным клещам, по которому проходит большой импульсный сварочный ток. Управление промышленным роботом, применяемым для контактной точечной сварки, – дискретное позиционное. Устройство управления рассчитано на работу в условиях сильных электромагнитных помех, создаваемых импульсами сварочного

тока. В качестве примера на рис. 8.23 показана автоматическая линия точечной сварки роботами корейской фирмы *Fanuc* кузовов автомобилей *Hyundai*.



Рис. 8.23 Автоматическая линия точечной сварки кузовов автомобилей

Дуговая сварка – более сложный технологический процесс, чем контактная точечная. Он требует осуществлять непрерывное перемещение сварочного электрода с определённой скоростью по сложной траектории вдоль свариваемого шва с одновременным осциллирующим поперечным его перемещением. Электрод при этом должен сохранять определённую ориентацию по отношению к плоскости шва.

Важным фактором, определяющим превосходство роботизированной дуговой сварки над ручной, является увеличение времени горения дуги. При ручной сварке это время составляет 20 – 30% всего времени цикла, поскольку оставшиеся 70 – 80% времени уходит на манипулирование защитным шлемом, респиратором и другим защитным оборудованием, чего не требуется при использовании робота. Кроме этого, даже опытный сварщик не в состоянии длительное время осуществлять равномерные осциллирующие движения электродом. Сварочный робот по про-

грамме может осуществлять осцилляцию сварочной головкой в 8 – 10 раз быстрее и качественнее, чем сварщик.

В функции устройства управления промышленным роботом для дуговой сварки помимо управления движением входит ещё регулирование параметров режима сварки (тока, напряжения дуги, притока инертного газа и т. д.). Управление при этом должно быть адаптивным. Функции адаптивной сварочной головки приведены в описании рис. 8.13.

Промышленные роботы для дуговой сварки часто комплектуются координатным столом с несколькими угловыми степенями подвижности для размещения на нём свариваемых изделий и манипулирования ими перед роботом (рис. 8.24).

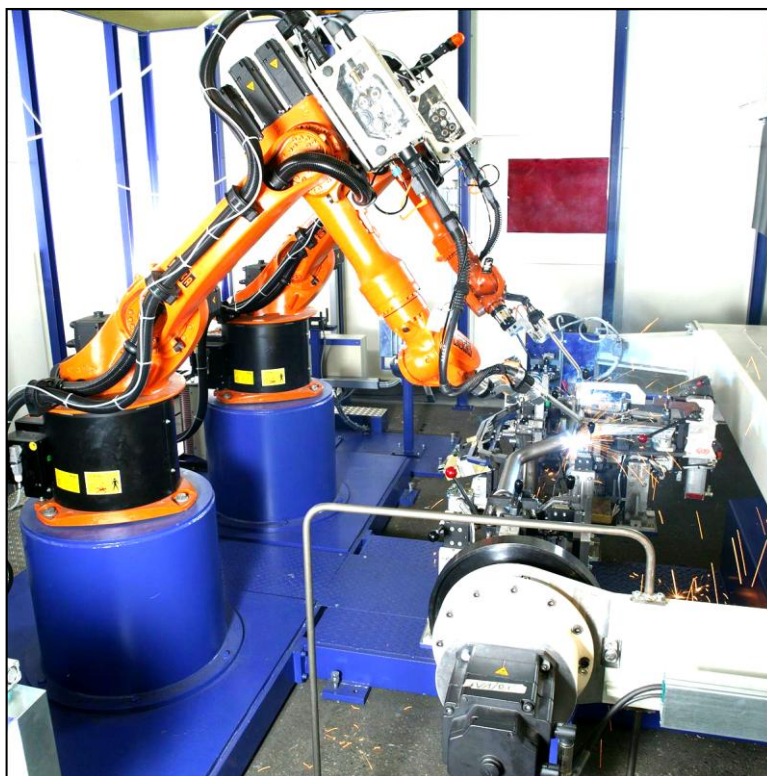


Рис. 8.24 Сварочный РТК в составе двух роботов фирмы *KUKA* (Германия) и координатного стола

Сборочное производство является наиболее сложной областью применения промышленных роботов. Сборка требует точности, повторяемости, разнообразия движений, применения изощрённых захватных устройств, а иногда комбинированных механизмов, в которых захват, кроме простого удержания деталей, играет активную и решающую роль в одной из операций сборки [10].

Сборочные операции в машиностроении составляют до 40% себестоимости изготовления изделий, а в приборостроении ещё больше – до 50 – 60%. Поэтому в основе решения применить промышленные роботы в автоматизированной сборке лежит стремление к экономии заработной платы и кратного повышения производительности сборочных операций. В большинстве случаев сборочные операции не являются опасными, грязными, сопряжёнными с работой в неблагоприятных или опасных для здоровья условиях. Следовательно, сборочный робот должен быть быстрым и производительным, чтобы конкурировать с ручной сборкой.

Другой побудительной причиной использования сборочного робота может оказаться точность. Некоторые сборочные операции, такие, как сборка электронных печатных плат, очень чувствительны к ошибкам, совершаемым людьми. Промышленные роботы не склонны к совершению ошибок такого типа.

Для успешно работающего сборочного РТК характерно наличие разнообразных тактильных, силомоментных и визуальных датчиков, позволяющих роботам контролировать результаты их деятельности и предпринимать соответствующие действия. Алгоритмы выполнения таких действий описаны в разделе 7.4.

Горячая штамповка и литьё под давлением также как и сварка являются вредными и опасными для здоровья человека технологическими операциями. Поэтому они – первейшие кандидаты на применение роботов. Детали, с которыми работает робот на этих операциях, находятся в разогретом состоянии. Поэтому программа системы управления роботом должна предусматривать погружение пальцев захвата через определённые интервалы времени в бак с охлаждающей жидкостью.

На рис. 8.25 показана схема двух связанных между собой РТК горячей штамповки. Каждый РТК обслуживает два робота. Первый робот 1 в каждом комплексе забирает разогретую заготовку из индукционной печи 2 и помещает её под пресс 3. Вторым роботом 4 разгружает пресс и передаёт заготовку на вспомогательную операцию обрубки заусенцев на прессе 5. Все операции на двух комплексах выполняются внутри ограждённой зоны.

Одной из особенностей использования роботов на операциях горячей штамповки является сопутствующее этой операции

изменение формы заготовки. Это может привести к необходимости разработки специального захвата для обеих форм сразу.

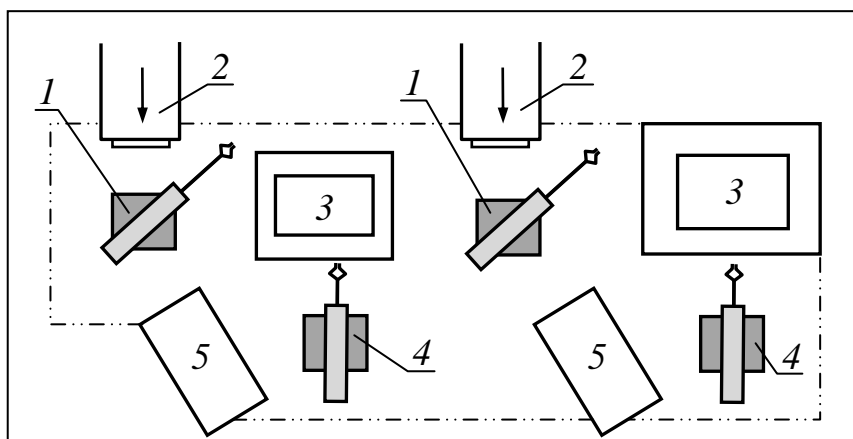


Рис. 8.25 Схема роботизированного участка горячей штамповки

На рис. 8.26 показан захват робота, оснащённый пружинами растяжения 1, позволяющими захватить заготовку 2 с небольшим диаметром, а затем, после штамповки, расплюснутую заготовку 3 с большим поперечным сечением.

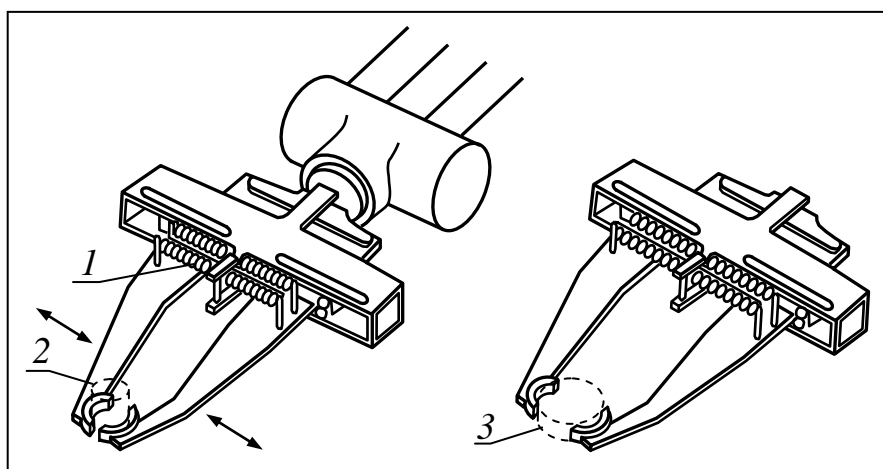


Рис. 8.26 Специальный захват робота для поковок

Удлиненная плоская форма пальцев захвата обеспечивает передачу необходимого усилия зажима без передачи излишнего количества теплоты от горячей заготовки к деталям захвата и руки робота.

Окраска распылением является ещё одной технологической операцией, где широко применяются промышленные роботы. Эта операция не только физически тяжела, но и вредна для здоровья человека. Кроме этого нанесение лакокрасочных покрытий связано с применением взрыво- и пожароопасных веществ. Поэтому

используемые на таких операциях роботы должны иметь взрыво-безопасное исполнение. Для нанесения покрытий широко применяют пульверизаторы. На рис. 8.27 показан промышленный робот совместного германо–корейского производства *ASIS/FANUC* с пульверизатором в качестве рабочего органа.



Рис. 8.27 Окрасочный робот

Управление окрасочными роботами, как правило, непрерывное (контурное) с программированием методом обучения. По сравнению со сварочными роботами требования к точности промышленных роботов для окраски существенно ниже, а к быстродействию, наоборот, выше.

Вспомогательные операции загрузки, разгрузки технологического оборудования, выполняемые промышленными роботами, имеют те же самые основные преимущества, что и роботизированная сварка, а именно: обеспечение безопасности и освобождение от необходимости вручную переносить тяжести.

Исторически сложилось так, что операции монотонной ручной загрузки и разгрузки прессов холодной листовой штамповки являются самыми травмоопасными (травматизм достигает 30%). Поэтому использование промышленных роботов на этих операциях экономически и социально оправдано в первую очередь. Основной особенностью применения роботов на холодной штамповке является необходимость обеспечения значительного быстродействия, поскольку цикл работы пресса измеряется несколь-

кими секундами. Используемые здесь промышленные роботы имеют простое цикловое управление и не более четырёх степеней свободы. Захватное устройство чаще всего выполняется в виде вакуумных присосок. Для обеспечения необходимой быстроты обслуживания пресса часто применяют роботы со сдвоенными манипуляторами – один для загрузки, а другой для разгрузки штампа.

Одна из самых распространённых областей применения промышленных роботов на вспомогательных операциях – обслуживание металлорежущих станков. Основные требования к технологическому оборудованию и компоновки РТК в составе робота и металлорежущих станков рассмотрены ранее в разделе 8.2.

8.5 Контрольные вопросы

8.1 Обоснуйте необходимость роботизации производства в условиях крупносерийного, серийного, мелкосерийного производства.

8.2 Каковы основные этапы роботизации существующего машиностроительного производства?

8.3 Каков содержание первого этапа роботизации?

8.4 Какие функции выполняет промышленный робот в составе РТК?

8.5 Какие требования предъявляются к технологическому оборудованию, входящему в состав РТК?

8.6 Каковы основные виды компоновок роботизированной технологической ячейки?

8.7 Каковы сравнительные преимущества и недостатки линейной и круговой компоновки РТК?

8.8 В чём заключается дооснащение РТК?

8.9 Каковы основные виды захватных устройств промышленных роботов?

8.10 В чём заключается и какова цель изменения конструкции деталей – объектов манипулирования?

8.11 Назовите основные виды вспомогательного оборудования.

8.12 Каковы особенности применения промышленных роботов на основных операциях машиностроительного производства.

Литература

1. Справочник по промышленной робототехнике: В 2 кн. Кн. 1 Под ред. Ш. Нофа; пер с англ. Д. Ф. Миронова. М.: Машиностроение, 1983, – 478 с.
2. Юревич, Е. И. Основы робототехники: 2-е изд., перераб. и доп./ Е. И Юревич. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. Конюх, В. Л. Основы робототехники: учеб. пособие / В. Л. Конюх. Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 282 с.
4. Валетов, В. А. Интеллектуальные технологии изготовления приборов и устройств: учеб. пособие / В. А. Валетов, А. А. Орлова, С. Д. Третьяков. СПб: СПбГУИТМО, 2008. –134 с.
5. Ермак, В. Н. Лекции по теории механизмов и машин: учеб. пособие – В. Н. Ермак; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1999. – 218 с.
6. Механика промышленных роботов: В 3 кн. Кн. 1. Кинематика и динамика: Учеб. пособие для втузов / Е.И. Воробьёв, С.А. Попов, Г.И. Шевелёва; Под ред. К.В. Фролова. М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
7. Бушуев, В. В. Механизмы параллельной структуры в машиностроении / В. В. Бушуев, И. Г. Хольшев. – Станки и инструмент, 2001, №1. – С. 3-9.
8. Шет, Уикер мл. Обобщённая система символических обозначений механизмов. – Конструирование и технология машиностроения, 1971, №1. – С. 96-106.
9. Накано, Э. Введение в робототехнику / Э. Накано. М.: Мир, 1988, – 334 с.
10. Асфаль, Р. Роботы и автоматизация производства / Р. Асфаль. М.: Машиностроение, 1989, – 448 с.
11. Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы: справочник / Ю. Г. Козырев. М.: Машиностроение, 1983, – 376 с.
12. Тимофеев, А. В. Адаптивные робототехнические комплексы / А. В. Тимофеев. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988, – 332 с.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
1 Что такое робот?	5
1.1 История развития робототехники	6
1.2 Роботы и робототехника	8
1.3 Определение, структура и поколения промышленных роботов	11
1.4 Классификация и основные показатели промышленных роботов	17
1.5 Контрольные вопросы	21
2 Структура манипуляторов	23
2.1 Задачи механики промышленных роботов	23
2.2 Структурный анализ манипуляторов	25
2.3 Структурный синтез манипуляторов	31
2.4 Манипуляторы параллельной структуры	34
2.5 Контрольные вопросы	37
3 Кинематика манипуляторов	39
3.1 Метод преобразования координат	39
3.2 Пример решения задач кинематики манипулятора	42
3.3 Автоматизированный метод кинематического анализа роботов	47
3.4 Контрольные вопросы	50
4 Динамика манипуляторов	51
4.1 Обратная задача динамики манипуляторов	51
4.2 Силовой расчёт манипуляторов матричным методом	56
4.3 Прямая задача динамики манипуляторов	59
4.4 Уравновешивание манипуляторов	71
4.5 Контрольные вопросы	74
5 Точность промышленных роботов	75
5.1 Кинематическая погрешность манипулятора	75
5.2 Вычисление линейной и угловой ошибки	76
5.3 Пример определения кинематической погрешности	78
5.4 Контрольные вопросы	79
6 Принципы работы манипулятора	80
6.1 Сервомеханизмы	80
6.2 Электрические сервомеханизмы	82
6.3 Электрогидравлические сервомеханизмы	92
6.4 Пневматические сервомеханизмы	96
6.5 Контрольные вопросы	99
7 Методы и языки программирования роботов	100
7.1 Программные системы управления	100
7.2 Адаптивные системы управления	114
7.3 Сенсорные устройства адаптивных роботов	116
7.4 Алгоритмы управления адаптивным роботом	124

7.5 Интеллектуальные системы управления	131
7.6 Контрольные вопросы	136
8 Технологическое применение промышленных роботов	137
8.1 Этапы роботизации	138
8.2 Планировка роботизированных технологических комплексов	142
8.3 Дооснащение роботизированных технологических комплексов	147
8.4 Особенности применения роботов в машиностроении	156
8.5 Контрольные вопросы	162
Литература	163