

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

А. Г. Кравцов, К. В. Марусич

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.05, 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Оренбург
2019

УДК 621.865.8 (075.8)
ББК 32.816я73
К 78

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В. Н. Михайлов

Кравцов, А. Г.

К 78 Промышленные роботы : учебное пособие / А. Г. Кравцов, К. В. Марусич; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2019. - 100 с.

ISBN

В учебном пособии представлены основные сведения о промышленных роботах. Рассмотрены проблемы и задачи роботизации производства. Описаны конструктивные особенности и основные компоновки промышленных роботов. Приведены общие сведения о конструкциях и принципах конструирования отдельных элементов промышленных роботов.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 15.03.05, 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, изучающих дисциплины «Транспортно-накопительные системы и промышленные роботы», «Проектирование машиностроительных производств», «Проектирование гибких производственных систем» и «Гибкие производственные системы», а также может быть рекомендовано для обучающихся технологических и конструкторских специальностей машиностроительных вузов.

Учебное пособие подготовлено в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК – 2017»)

УДК 621.865.8 (075.8)
ББК 32.816я73

ISBN

© Кравцов А. Г.,
Марусич К. В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение	4
1 Общие сведения.....	6
1.1 Проблемы и задачи роботизации производства.....	6
1.2 Основные понятия и определения	8
1.3 Классификация промышленных роботов	11
Контрольные вопросы.....	25
2 Структура промышленных роботов	26
2.1 Основные элементы	26
2.2 Приводы	36
2.3 Исполнительный механизм	53
Контрольные вопросы.....	65
3 Компоновки промышленных роботов.....	66
Контрольные вопросы.....	77
4 Конструкции промышленных роботов	78
4.1 Общие сведения о конструкциях.....	78
4.2 Принципы конструирования и расчётов промышленных роботов.....	87
Контрольные вопросы.....	91
5 Захватные устройства	92
Контрольные вопросы.....	98
Список использованных источников	99

Введение

Комплексная автоматизация производства в условиях большой номенклатуры и частой сменяемости изделий определяет необходимость повышения его гибкости.

Приобретение опыта по автоматизации и развитие систем числового программного управления относятся к числу причин, обусловивших потребность в создании принципиально нового класса машин – промышленных роботов.

В настоящее время роботы широко используются для выполнения разнообразных операций практически во всех отраслях деятельности человека. Так в промышленном производстве их применяют для реализации в автоматическом режиме таких, например, операций как установка заготовок и съем готовых деталей, погрузка и разгрузка, сборка, сварка, включение и выключение оборудования и т.д., то есть для автоматизации, как основных технологических операций, так и вспомогательных. Особые свойства данного класса машин позволили применять их в процессах, автоматизация которых традиционными средствами была не возможна. Создаваемые на их основе робототехнические (роботизированные) комплексы, представляют собой принципиально новые технические средства, обеспечивающие возможность автоматизации различных видов деятельности, т.е. комплексную автоматизацию производства, что позволило создавать малолюдные и безлюдные технологические процессы и производства. Сегодня функционирование предприятий в таких передовых отраслях как самолетостроение, автомобилестроение и многих других немыслимо без использования в них промышленных роботов.

Специализация создания промышленных роботов, способствуя снижению их себестоимости и, соответственно, цены, является необходимым условием для расширения объемов внедрения в производство этого класса машин.

Использование грамотных конструкторских решений на этапе разработки технического объекта, обоснованный выбор технологического оборудования в процессе технологической подготовки производства базируются, в том числе, и на знании такой дисциплины как транспортно-накопительные системы и промышленные роботы.

Цель настоящего учебного пособия заключается в способствовании формирования у обучающихся знаний последовательности и методик расчёта и конструирования элементов и узлов промышленных роботов и умения их практического использования.

Достижение указанной цели способствует формированию компетенции, направленной на способность выполнять работы по автоматизации технологических процессов и производств, готовность использовать современные методы и средства автоматизации управления производственными процессами и жизненным циклом продукции.

1 Общие сведения

1.1 Проблемы и задачи роботизации производства

Роботы как новый класс машин появились в конце 30-х годов прошлого столетия. Первым термин «робот» употребил чешский писатель Карел Чапек в 1920 г. в произведении о механических людях. Смысловая нагрузка этого термина была определена чешским словом *robota*, означающим работу. Однако изначально применение роботов носило характер развлечений и никак не связывалось с возможностью их промышленного использования, чем и определялось стремление придать им внешний вид аналогичный внешности человека.

Промышленные роботы в Советском Союзе серийно впервые стали выпускать в 1972 - 1973 гг. [1]. В период с 1980 по 1981 года уже выпускалось примерно 50 различных моделей роботов. В то время рост темпов разработок и серийного выпуска промышленных роботов был характерен для всех промышленно развитых стран.

Не останавливаясь на предыстории вопроса формирования предпосылок создания промышленных роботов, назовем сразу их основную задачу. Основная задача промышленных роботов заключается в комплексной автоматизации производства [2-4]. Суть комплексной автоматизации состоит в автоматизации различных видов деятельности, т.е. как автоматизации процессов по совершению полезной работы, связанной с затратами механической энергии, так и автоматизация операций по сбору, переработке и передачи информации, выработке на основании этой информации управляющих воздействий, т.е. процессов управления, связанных с использованием «интеллекта». Подтверждения тому проявятся уже при рассмотрении вопросов классификации. Названия отдельных групп робототехнических систем отображают те задачи, для решения которых они предназначены.

В рассуждениях об особенностях этого класса машин, в первую очередь, следует отметить их назначение, обусловленное решением только что рассмотренной задачи – комплексной автоматизации. Еще одной важной структурной особенностью является, как правило, незамкнутость кинематической цепи, что обуславливает определенные дополнительные требования к приводам этих машин. При этом, в

процессе функционирования кинематическая структура этих машин способна изменяться с точки зрения количества кинематических пар и их подвижности. Так, например, в процессе торможения подвижная кинематическая пара может стать неподвижной. Помимо широты диапазонов скоростей и перемещений этих машин, а так же точности, отметим режимы функционирования приводов, которые, как правило, работают в переходных режимах, чередующих разгоны и торможения.

По поводу основной проблемы роботизации производства скажем, что основное содержание этого вопроса связано с надлежащей технологической подготовкой предприятия. Основным моментом в данном контексте, помимо всех остальных, которые связаны с подготовкой обслуживающего персонала, заменой оборудования и др., является формирование самого технологического процесса с участием этих машин.

Говоря о состоянии робототехнических систем, следует отметить, что робототехника является одним из знаковых направлений развития науки и техники XXI века. Как машина-автомат принципиально нового типа, робот может быть и технологической машиной, и транспортной, и информационной, а может и вообще выпадать из этой категории, выполняя функции технологического приспособления или средства автоматизации.

Основу современной робототехники составляют компьютерные технологии. Современные роботы используются человеком в различных областях: в производстве, дома, в офисе, в центрах реабилитации, в больницах, школах и университетах, их используют в военных целях и в работе спецслужб.

Сегодня роботы прочно освоили нишу производственных процессов, используются для работы в опасных для жизни человека условиях или в тех условиях, где возможности человека ограничены его природой. Современные достижения во всех отраслях человеческой деятельности обусловлены использованием роботов и немыслимы без них, как немыслимы уже без них сегодня сами эти отрасли.

К примеру, в промышленном производстве, автомобиле- и самолетостроении роботы сегодня автоматизируют как основные операции технологического процесса

(гибка, сварка, сборка, обработка и т.д.), так и как вспомогательные, обеспечивая значительное сокращение необходимой численности рабочих.

Достижения современной медицины тоже в значительной степени обязаны роботам. Медики получили в свои руки инструмент, который значительно расширил возможности врача в хирургии, кардиологии, гинекологии, урологии, офтальмологии. Элементы роботов активно внедряются реабилитационную деятельность, восстанавливающую утраченные способности людей, потерявших конечности.

Ведутся активные работы по созданию роботов для использования в военной и космической отраслях.

Однако, у современных роботов существуют и нерешённые пока еще проблемы, к которым можно отнести такие как оцувствление, интеллектуализация, энергопотребление и энергосбережение.

Среди перспектив развития роботов необходимо отметить такие, как переход от использования индивидуальных роботов к коллективному использованию, создание самокоординирующих систем, переход от жестких к мягким системам (био- и хемогибриды, нейро и клеточные интерфейсы), использование свойств новых материалов (жидкостные, молекулярные и коллоидные роботы), создание технологических клеток, интегрирование компьютеров в специальные мобильные устройства, способные самостоятельно передвигаться, создание RFID – радиоидентификационных имплантатов для людей и животных.

Все перечисленное относится и к робототехническим системам, используемым в промышленном производстве с учетом соответствующих поправок на их специфику.

1.2 Основные понятия и определения

Для использования в науке, производстве и при изучении основные понятия, термины и определения в области манипуляторов, автооператоров и промышленных роботов регламентированы стандартом ГОСТ 25686 – 85 [5] и являются обязательными

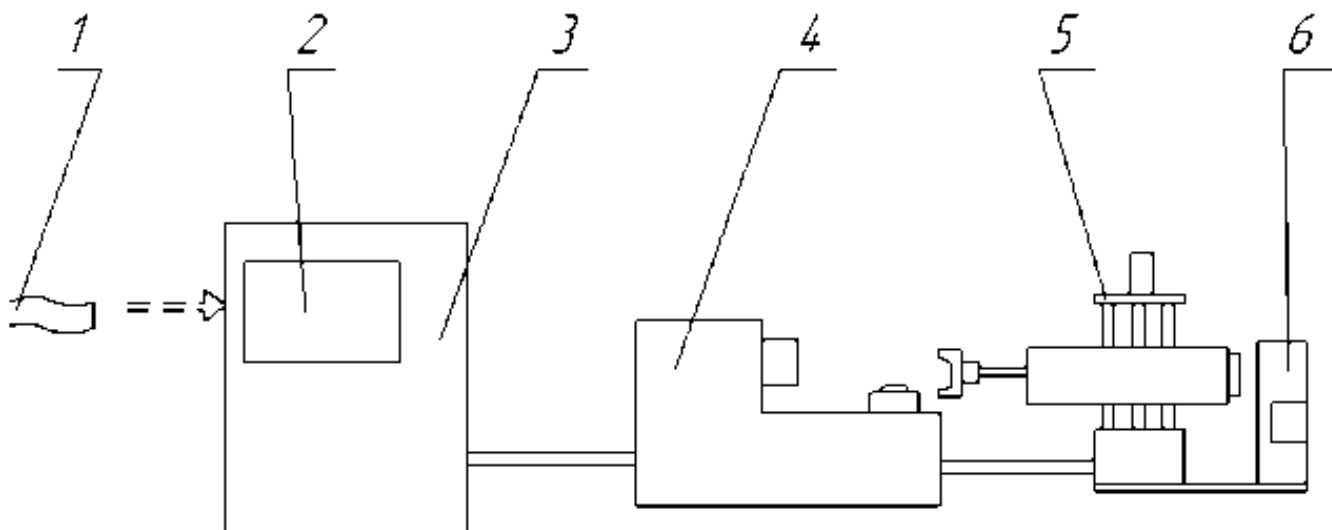
для применения в документации всех видов, научно-технической, учебной и справочной литературе.

На данном этапе приведем лишь некоторый необходимый для этого этапа минимум понятий и определений. Робот (Р) – автоматическая машина, включающая перепрограммируемое устройство управления и другие технические средства, обеспечивающие выполнение тех или иных действий (в зависимости от назначения Р), свойственных человеку в процессе его трудовой деятельности [6]. Наиболее совершенные Р способны самостоятельно и в комплексе решать задачи по самоуправлению, адаптации и реализации трудовых воздействий. Различия роботов определяются их техническим уровнем, показателями систем управления, информационного обеспечения и исполнительных органов. Наличием этих различий, а так же назначением, областью применения, условиями эксплуатации и целым рядом других факторов определяется многообразие роботов вообще и промышленных роботов в частности, образующих в результате большой класс машин, суть назначения которых – выполнение самых разнообразных операций. Общий признак роботов можно сформулировать как их способность (возможность) быстро перенастраиваться на выполнение различных действий в условиях автоматизированного или автоматического производства.

ГОСТ 25686 – 85 определяет понятие промышленный робот (ПР) как автоматическую машину, стационарную или передвижную состоящую из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Технические системы, в целом, и станочные, в частности, характеризующиеся наличием в своей структуре одного или нескольких роботов, обладают значительно более широкими возможностями, выделяющими их в отдельную группу оборудования. Называют их робототехническими или роботизированными технологическими системами (РТС). То есть, можно сказать, что результатом оснащения технических систем одним или несколькими роботами, как показано на рисунке 1.1, является образование РТС, способных удовлетворять современным требованиям создания гиб-

ких автоматизированных производств и осуществления трудо- и ресурсосберегающих технологий. Таким образом, РТС представляют собой принципиально новое техническое средство для комплексной автоматизации различных производств.



1 – программноноситель; 2 – устройство ввода УП; 3 – устройство управления металлорежущего станка; 4 – металлорежущий станок; 5 – манипулятор промышленного робота; 6 – устройство управления робота.

Рисунок 1.1 – Пример структуры роботизированной технической системы

В отличие от РТС используемое понятие роботизированного технологического комплекса (РТК) подразумевает автономность действий совокупности одной или нескольких единиц технологического оборудования, промышленного робота и средств оснащения, обеспечивающей автоматический цикл работы внутри комплекса и его связь с соответствующими потоками остального производства, осуществляющей многократные циклы.

Отметим, что технологическим оборудованием может быть промышленный робот, средствами оснащения РТК могут быть как устройства накопления, ориентации и поштучной выдачи объектов производства, так и другие, обеспечивающие функционирование РТК. Кроме того, РТК может быть образован одним промышленным роботом, обеспечивающим как индивидуальное, так и групповое обслуживание используемого с ним оборудования либо законченный цикл обработки

изделия (например, сварки, окраски). РТК так же может образован на базе нескольких промышленных роботов, которые реализуют взаимозависимые операции над объектами производства на одном рабочем месте. РТК представляет собой основную структурную единицу любой РТС. РТК, работающие в гибкой производственной системе (ГПС), должны быть автоматизировано переналаживаемыми и встраиваемыми в систему. Для обеспечения возможности встраивания в ГПС РТК оснащают унифицированными блоками для подсоединения к общей системе управления ГПС и ее транспортным и информационным коммуникациям. В этом случае РТК приобретают все признаки, свойственные гибкому производственному модулю, становясь минимальными структурными единицами ГПС.

1.3 Классификация промышленных роботов

Общая классификация РТС выделяет три следующих больших класса этих систем (и соответствующих им роботов):

- манипуляционные;
- мобильные (движущиеся);
- информационные и управляющие.

Информационные РТС представляют собой комплексы измерительно-информационных систем и управляющих средств, автоматически реализующих сбор, обработку, передачу информации и формирование в соответствие с этой информацией различных управляющих сигналов (системы автоматического контроля и управления производством).

Мобильные РТС это подвижные системы, имеющие в своей структуре передвижных роботов, которые обеспечивают автоматическое перемещение объектов манипулирования в пространстве. Как правило, это технические системы, в состав которых входят подъемно-транспортные роботы в виде тележек, штабелеров и перемещающих роботов с запрограммированными маршрутами перемещений и запрограммированной автоматической адресовкой цели. Они применяются для обслуживания складов, перевозок объектов между цехами и участками и т.п.

Чтобы сформировать представление о наиболее развитых и наиболее распространенных сегодня манипуляционных робототехнических системах и соответствующих им роботах рассмотрим их более подробно. Как показано на рисунке 1.2 манипуляционные робототехнические системы, и соответствующие им роботы и манипуляторы, подразделяются на виды, роды и типы [7].

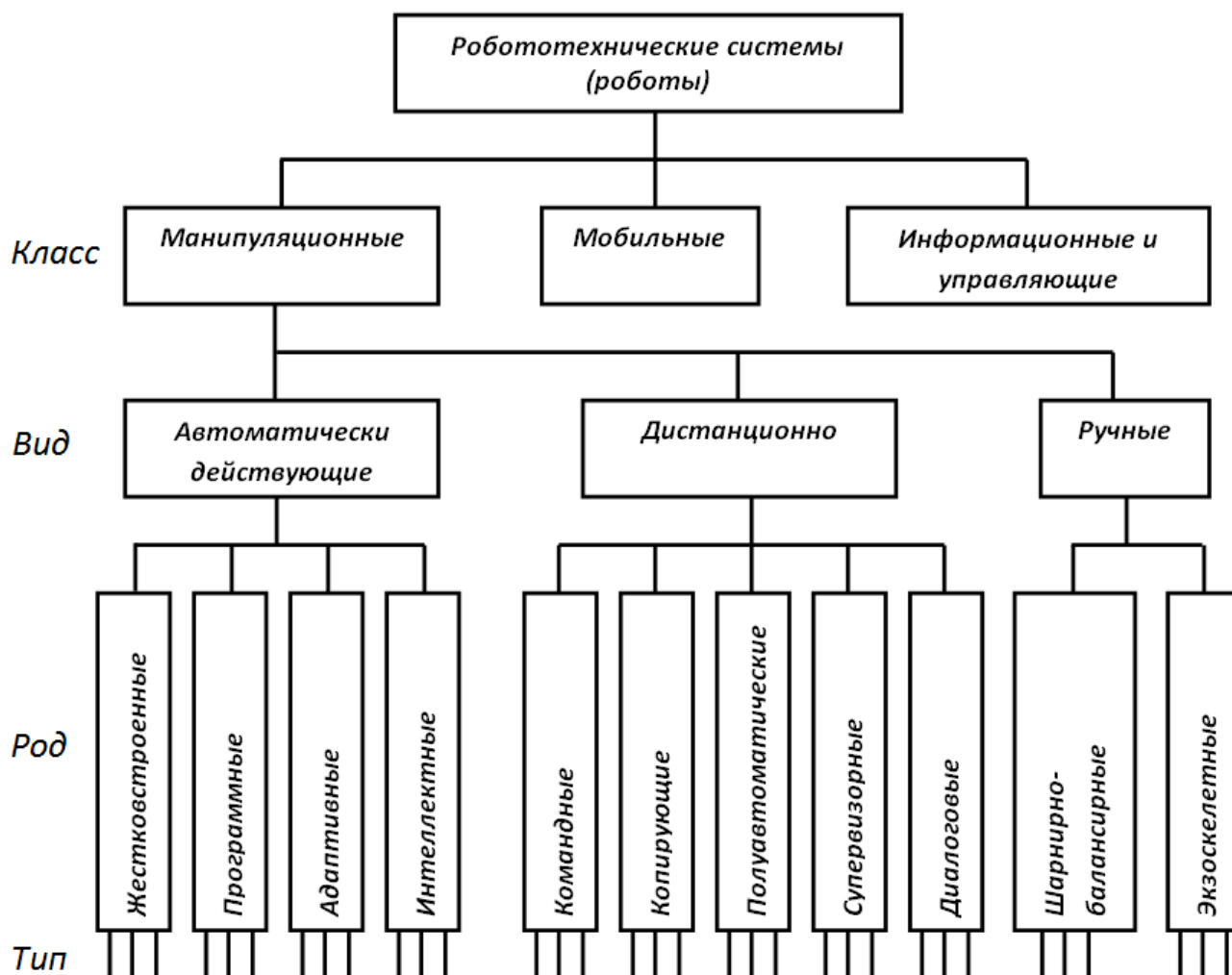


Рисунок 1.2 – Классификация манипуляционных робототехнических систем

Совокупность автоматически действующих роботов класса манипуляционных РТС образована четырьмя родами: жестковстроенные, программные, адаптивные, интеллектуальные. Термин «интеллектуальные» возник как альтернативный термину «интеллектуальный» применительно к свойствам машин, внешне напоминающим и, отчасти, совпадающим с мыслительной деятельностью человека. Некоторые авторы вместо

термина «род» в данном контексте используют термин «поколение», несущий несколько иную от общепринятой смысловую нагрузку. Иными словами эти поколения не сменяют друг друга, а существуют параллельно, развиваясь внутри себя.

Жестковстроенные манипуляторы называют нулевым (дороботным) поколением, которое характеризуется отсутствием у них собственных переналаживаемых (перепрограммируемых) устройств программного управления. В результате жестко связанные с остальным технологическим оборудованием они управляются системой управления этого оборудования и представляют собой манипуляторы и автооператоры.

Программные роботы или, как их еще называют, роботы первого поколения комплектуются управляемыми приводами для всех кинематических пар (называемых некоторыми авторами суставами), образованных их звеньями. Наличие собственной переналаживаемой системы программного управления обеспечивает их перепрограммирование на выполнение различных операций. Однако соответствие своему функциональному назначению этих роботов возможно лишь в строго определенной обстановке, для чего необходимо использование дополнительных приспособлений. Это приводит к удорожанию их эксплуатации, снижению гибкости и сужению использования.

Адаптивные роботы – роботы второго поколения допускают некоторую недетерминированность внешней среды или ее изменение в определенных пределах, что расширяет их возможности при эксплуатации без дополнительной технологической оснастки, повышает гибкость и производительность. Достигается это использованием в конструкции роботов датчиков, реагирующих на обстановку и систем обработки информации от датчиков, выполняемых в компактных микропроцессорных устройствах. Говоря иначе, адаптивные роботы в состоянии самостоятельно в определенных пределах перепрограммировать (гибко изменять) движения манипулятора, приспособляясь к изменениям внешней среды.

Интеллектуальные роботы или роботы третьего поколения отличает наличие более богатого осязания, обеспечиваемого использованием комплекса средств осязания совместно с системами технического зрения и развитой микропроцессорной обработкой информации. Наличие перечисленных средств придает этим робо-

там определенные свойства искусственного интеллекта. Это позволяет роботу работать в недетерминированной внешней среде или приспосабливаться к ее изменениям, за счет программирования самим роботом движений манипулятора путем автоматической выработки «решений» о своих дальнейших действиях, основанных на распознавании обстановки и направленных на решение поставленной задачи, которую оператор вводит в его систему управления в наиболее общей форме. Перечисленные факторы позволяют работать этим роботам с движущимися объектами, с объектами различных форм и размеров, самостоятельно ориентированными в пространстве и т.д.

Типы роботов определяют в соответствии с видом энергоносителя, обеспечивающим движение манипулятора и его звеньев. Различают четыре типа роботов: электромеханический, пневматический, гидравлический и комбинированный.

Из всего многообразия роботов стандартом выделяется часть, называемая промышленными. Основную часть промышленных роботов (ПР), применяемых в машиностроении, образует четыре поколения, относящиеся к виду автоматически действующих класса манипуляционных РТС. По этой причине не станем останавливаться на рассмотрении роботов, относящихся к дистанционно-управляемым и ручным, а так же классов мобильных и информационных и управляющих РТС и относящихся к ним роботов, т. к. определенная часть из них относится к промышленным роботам, а перейдем сразу к рассмотрению классификации последних.

ГОСТ 25685 – 83 [8] предусматривает для классификации промышленных роботов следующие признаки: специализация, грузоподъемность, число степеней подвижности, возможность передвижения, способ установки на рабочем месте, вид системы координат, вид привода, вид управления, способ программирования. Составители документа считали эти признаки необходимыми для разработки типажа. Однако рассматривая этот вопрос, различные авторы используют и другие дополнительные признаки. На наш взгляд, наиболее полная классификация промышленных роботов представлена Ю.Г. Козыревым [9], приведенная с некоторыми дополнениями и изменениями на рисунке 1.3. Она помимо девяти регламентированных стандартом использует еще восемь дополнительных немаловажных по нашему мнению признаков.

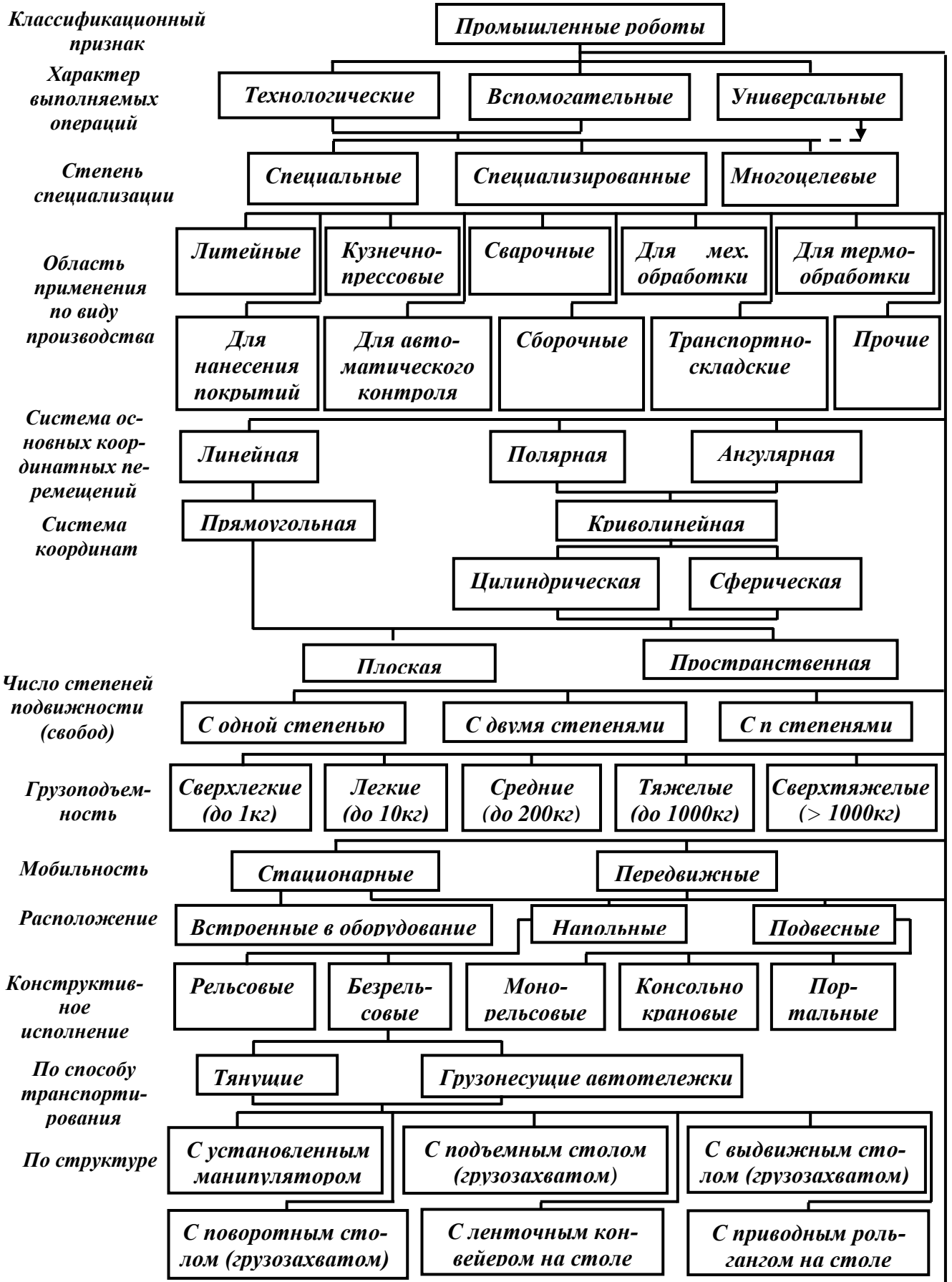


Рисунок 1.3 – Классификация промышленных роботов

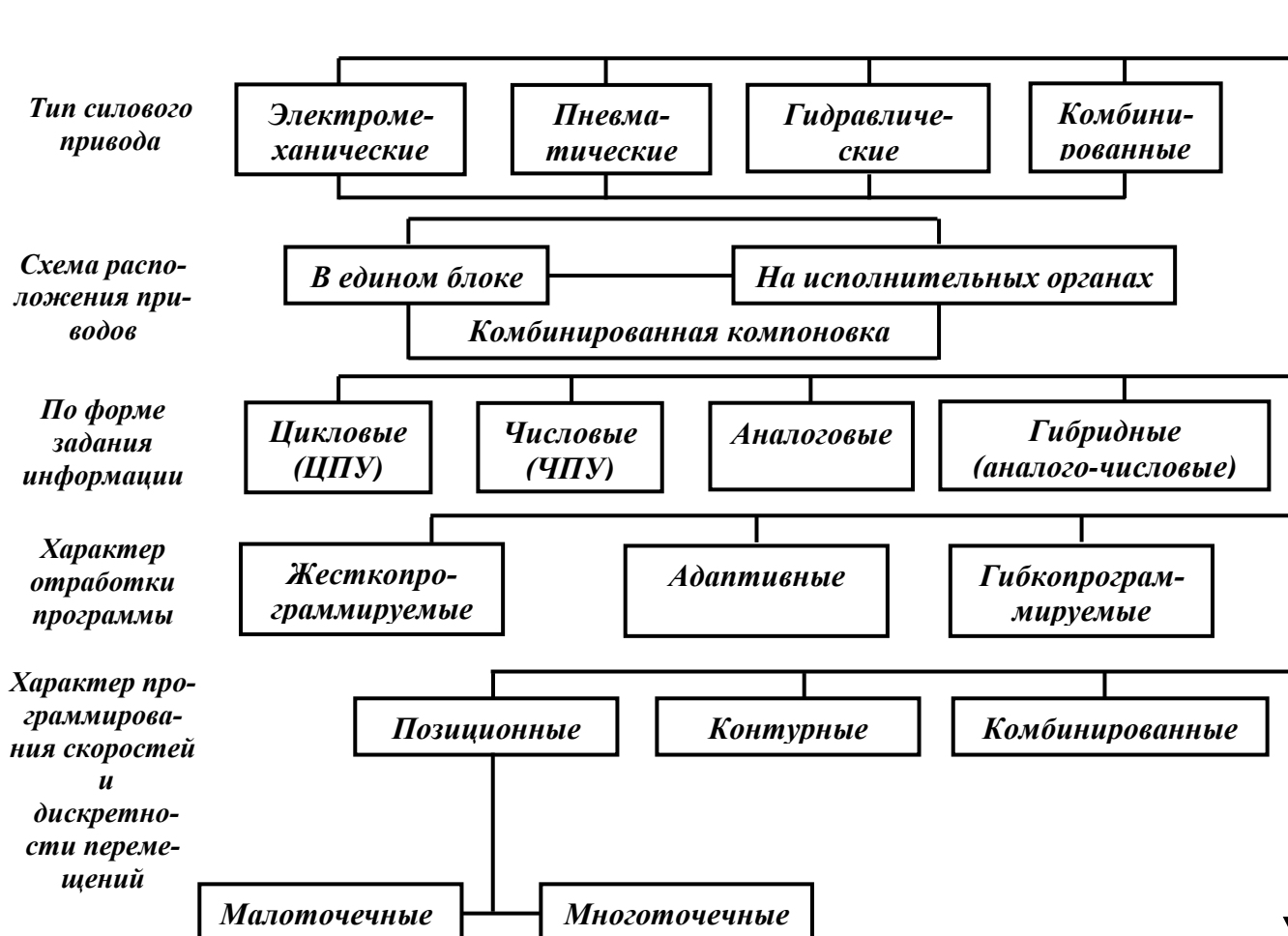


Рисунок 1.3 (продолжение) – Классификация промышленных роботов

Назначение и функциональные возможности групп промышленных роботов соответствуют их названиям, обусловленным классификационными признаками и, в основном, не нуждаются в дополнительных разъяснениях. Но все же названия некоторых групп следует пояснить.

Итак, по характеру выполняемых операций различают технологические, вспомогательные и универсальные промышленные роботы. Технологические ПР, которые иногда еще называют производственными, (ТПР) предназначены для выполнения основных технологических операций, т.е. они непосредственно участвуют в техпроцессе в качестве основного технологического оборудования (производящих машин), изменяя свойства предметов труда (гибка, сварка, окраска, сборка и т.д.). Вспомогательные или подъемно-транспортные ПР (ВПР) способны выполнять функции переноса объекта в пространстве. Их применяют для автоматизации опера-




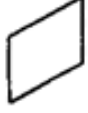



















ций по обслуживанию основного технологического оборудования (замена инструмента, заготовки, оснастки, удаление стружки, очистка базовых поверхностей и т.д.). Универсальные промышленные роботы (УПР) способны выполнять как основные технологические так и вспомогательные операции.

Особенностью специализации промышленных роботов является их принадлежность к группам ТПР, ВПР или УПР. То есть специализация определяется либо видом выполняемых основных технологических операций, либо видом обслуживаемого основного технологического оборудования. Промышленные роботы, относящиеся к группе многоцелевых, предназначены как для выполнения различных технологических операций, так и для обслуживания различного технологического оборудования.








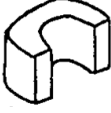






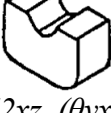






Различие систем основных координатных перемещений состоит в том, что линейная обеспечивает перемещения захватного устройства только вдоль координатных осей, ангулярная (угловая) – изменяет лишь угловые положения звеньев манипулятора друг относительно друга, а полярная система реализует оба вида движений звеньев манипулятора. В таблице 1.1 представлены наиболее распространённые формы рабочих зон, зависящие от вида системы координат, в которой выполняются транспортирующие и координатные движения звеньев механической системы.

По форме задания информации различают промышленные роботы с аналоговыми системами программного управления (АПУ), с системами циклового (ЦПУ) и числового (ЧПУ) программного управления, а так же с гибридными (аналого-числовыми) системами. Суть аналоговых систем программного управления состоит в том, что информация в них задается в виде непрерывно изменяющихся значений физических (аналоговых) величин. Системы ЦПУ позволяют управлять последовательностью выполняемых действий (перемещений исполнительных механизмов ПР), величиной выдержки времени схвата в точке и иногда скоростями перемещений. Вся информация о величинах перемещений задается установкой упоров, кулачков, конечных переключателей. Отличительная особенность числового программного управления заключается в том, что вся необходимая для функционирования робота информация формируется и вводится в систему программного управления (СПУ) в виде цифровых кодов (чисел).

Таблица 1.1 - Системы координат основных движений промышленных роботов и формы рабочих зон

Движения		Система координат				
		Прямоугольная декартова R	полярная		ангулярная	
			цилиндрическая C	сферическая P	цилиндрическая AC	сферическая AP
Основные	плоские	 $R1 (xy)$	 $P1 (φr)$		 $AP1 (φφ_1)$	
		 $R2 (xz)$	 $P2 (θr)$		 $AP2 (θθ_1)$	
	пространственные	-	 $C1 (φz)$	-	-	-
		-	 $C2 (θφ)$	-	-	-
		 $R3 (xyz)$	 $C3 (φρz)$	 $P3 (φθz)$	 $AC3 (φφ_1z)$	 $AP3 (φθ_1θ)$
		-	 $C4 (θρx)$	 $P4 (θφr)$	 $AC4 (θθ_1x)$	 $AP4 (θφ_1φ)$
	Комбинированные с дополнительными линейными перемещениями	+ x	-	 $C1x (φzx)$	-	-
			-	 $C3x (φρzx)$	 $P3x (φθrx)$	 $AC3x (φφ_1zx)$
-			-	 $P4xy (θφrxy)$	-	 $P4x (θφ_1φx)$

Продолжение таблицы 1.1

Движения		Система координат				
		Прямоугольная декартова R	полярная		ангулярная	
			цилиндрическая C	сферическая P	цилиндрическая AC	сферическая AP
Комбинированные с дополнительными линейными перемещениями	+ x	-	 $C2z (\theta xz)$	-	-	-
		-	-	 $P3z (\phi \theta rz)$	-	 $AP3z (\phi \theta_1 \theta z)$
		-	 $C4z (\theta \rho xz)$	 $P4z (\theta \phi rz)$	 $AC4z (\theta \theta_1 xz)$	 $AP4z (\theta \phi_1 \phi z)$
	+ xy	-	 $C1xy (\phi zxy)$	-	-	-
		-	 $C3xy (\phi \rho zxy)$	 $P3xy (\phi \theta rxy)$	 $AC3xy (\phi \phi_1 zxy)$	 $AP3xy (\phi \theta_1 \theta xy)$
		-	-	 $P4x (\theta \phi rx)$	-	 $AP4xy (\theta \phi_1 \phi xy)$
	+ xz	-	 $C2xz (\theta yxz)$	-	-	-
		-	-	 $P3xy (\phi \theta rxz)$	-	 $AP3xz (\phi \theta_1 \theta xz)$
		-	 $C4xz (\theta \rho yxz)$	 $P4xz (\theta \phi ryz)$	 $AC4xz (\theta \theta_1 yxz)$	 $AP4xz (\theta \phi_1 \phi xz)$

Так называемые гибридные СПУ промышленных роботов позволяют использовать различные способы представления вводимой (управляющей) информации. То есть задаваемая информация может вводиться, как в аналоговой, так и в числовой форме.

Возможности промышленных роботов, относящихся к группам жестко программируемых, адаптивных и гибко программируемых определены возможностями роботов первого, второго и третьего поколений, приведенных на рисунке 1.1.

Сравнивая позиционные и контурные системы программного управления промышленных роботов, отметим, что первые обеспечивают отработку перемещений исполнительных механизмов роботов только от точки к точке, а контурные системы управляют движениями по траектории требуемой формы и размеров. Комбинированные СПУ ПР сочетая в себе свойства как позиционных, так и контурных систем, обеспечивают функционирование робота в любом из этих режимов.

В классификации, приведенной на рисунке 1.2 ПР разделяются на группы в соответствии с видами производства. Для задания основных параметров и установления размерных рядов промышленных роботов общемашиностроительного применения с обязательным условием пригодности их для работы в составе гибких производственных модулей, участков или линий (ГПМ, ГПУ, ГПЛ) образованы типоразмерные ряды. Группы ПР, в соответствии с видом производства, имеют следующее обозначение: А — для обслуживания литейных машин; Б — кузнечно-прессового оборудования; В — металлорежущих станков; Г — линий гальванопокрытий; Д — выполнения сборочных операций. В каждой группе модели ПР располагаются по возрастанию по грузоподъемности. Примеры типоразмерных рядов ПР, используемых в станкостроении для обслуживания кузнечно-прессового оборудования (КПО) и металлорежущих станков, приведены в таблицах 1.2 и 1.3.

В результате анализа основного состава технологического оборудования по отраслям, во взаимосвязи с деталями различной массы, обрабатываемыми на основном технологическом оборудовании, обслуживаемом роботами, внутри каждой серии установлены ряды грузоподъемности ПР.

Таблица 1.2 – Промышленные роботы для обслуживания КПО (группа Б)

Номер в группе	Назначение ПР	Модель	Грузоподъемность (кг) на число рук	Конструктивное исполнение	
Б1	ПР для подачи заготовок на одно-кривошипные открытые прессы простого действия усилием до 100 кН	КМ0,08Ц42.11	0,08X1	Напольное с выдвижной рукой и консольным механизмом подъема	
Б2		КМ0,63Ц41.12	0,63X1	Напольное с выдвижной рукой и консольным механизмом подъема	
Б3	ПР для загрузки-выгрузки заготовок на листоштамповочных прессах усилием 630 кН	КМ1,25Ц42.16	0,63X2	Напольное, с выдвижной рукой и консольным механизмом подъема, с двумя руками	
Б4	Б4.1	ПР агрегатной конструкции для обслуживания прессов	МА2,5Ц42.01	1,25x2	Напольное, с выдвижными руками и механизмом подъема, двурукое
	Б4.2		МА2.5Ц42.02	0,8X3	Напольное, с выдвижными руками и механизмом подъема, трехрукое
	Б4.3		МА2,5Ц42.03	1,25X2	То же, что МА2,5Ц42.01, но с промежуточным точным позиционированием рук
Б5	Б5.1	ПР агрегатной конструкции для обслуживания прессов	МА5Ц42.01	2,5X2	То же, что МА2,5Ц42.01
	Б5.2		МА5Ц42.02	1,6X3	То же, что МА2,5Ц42.02
	Б5.3		МА5Ц42.03	5,0X1	То же, что МА2,5Ц42, но однорукое
Б6	Б6.1	ПР агрегатной конструкции	МА10Ц42.01	5,0X2	То же, что МА5Ц42.01
	Б6.2		МАЮЦ42.02	3,2X3	То же, что МА5Ц42.02
Б7	ПР для загрузки-выгрузки заготовок при обслуживании прессов усилием 10000 - 25 000 кН	КМ10Ц31.01	10X1	Напольное с выдвижной рукой и качающейся кистью	
Б8	ПР для обслуживания прессов усилием 25000 - 65 000 кН	КМ40Ц31.01	40X1	Напольное с выдвижной рукой и качающейся кистью	

Таблица 1.3 – Промышленные роботы для обслуживания металлорежущих станков (группа В)

Номер в группе	Назначение ПР	Модель	Грузоподъемность (кг) на число рук	Конструктивное исполнение
В1	ПР для обслуживания металлорежущих станков	М10П62.01	10Х1	ПР встроен в станок
В2	ПР для обслуживания металлорежущих станков	М20П40.01	20Х1	ПР напольной конструкции
В3	ПР для обслуживания металлорежущих станков	М20П40.01	20Х1	
В4	ПР агрегатной конструкции для обслуживания металлорежущих станков	М20Ц48.01		Базовая модель агрегатной гаммы, включающая полный набор модулей
		М20Ц48.02	10Х2	То же, что М20Ц48.01, но без поворота кисти руки
		М20Ц48.11	10Х2	То же, что М20Ц48.01, но в одноруком исполнении (может оснащаться двойным хватом)
		М20Ц48.12	10Х2	То же, что М20Ц48.02, но в одноруком исполнении
		М20Ц05.01	10Х2	То же, что М20Ц48.01, но без качания рук
		М20Ц05.02	10Х2	То же, что М20Ц05, но без поворота кисти руки
		М20Ц05.11	10Х2	То же, что М20Ц05.01, но в одноруком исполнении
		М20Ц05.12	10Х2	То же, что М20Ц05.11, но без поворота кисти руки
В5	ПР для обслуживания металлорежущих станков с горизонтальной осью шпинделя	М40П08.01	20Х2	Портальное двурукое с вертикальным перемещением рук
В6	ПР для обслуживания металлорежущих станков с горизонтальной осью шпинделя	3М40Ф2.80.01	40Х1	То же, что М40П08.01, но с двухзвенной рукой рычажного типа

Продолжение таблицы 1.3

B7	B7.1	ПР агрегатной конструкции для обслуживания станков с горизонтальной и вертикальной осью шпинделя	M40П05.02	40X1 (при двух схватах 40X2)	Базовая модель гаммы (имеет одно- или двухзахватное исполнение)
	B7.2		M40П05.03		То же, что M40П05.02, но без поворота кисти со схватом
B8		ПР для обслуживания токарных станков моделей 1620ФЗС19 и 16К20Т1	СМ80Ц48.15	40X2	Портальное, двурукое с выдвигной рукой
B9		ПР для обслуживания станков при обработке валов	МА80Ц49.01	40X2	Портальное имеет несколько модификаций, различающихся величинами перемещений рук
B10	B10.1	ПР агрегатной конструкции для обслуживания станков с горизонтальной осью шпинделя при обработке деталей типа фланцев	МА80Ц48.01	40X2	Базовая модель
	B10.2		МА80Ц25.01	40X2	Базовая модель без качания рук с тактовым
	B10.3	ПР агрегатной конструкции для обслуживания станков с горизонтальной осью шпинделя при обработке деталей типа фланцев	МА80Ц01.01	40X2	Базовая модель МА80Ц25 без тактового стола
	B10.4		МА80Ц25.05	40X2	
B11		ПР агрегатной конструкции напольного типа	МА80Ц40.01	40X2	Напольное, поворотное с выдвигной рукой и механизмом подъема
B12		ПР многоцелевого назначения	УМ160Ф2.81.01	160X1	Портальное с шарнирной конструкцией руки
B13	B13.1	ПР агрегатной конструкции многоцелевого назначения	МА160П51.01	160X1	Портальное, однорукое с шарнирной конструкцией
	B13.2		МА160П01.02	160X1	То же, что МА160П51.01, но без качания руки и с шаговым приводом поворота кисти

Предлагаемые ряды регламентируют максимальное значение грузоподъемности для каждого типоразмера ПР, обеспечиваемое при номинальных значениях эксплуатационных характеристик (скорости перемещений рабочих органов манипулятора, максимальных вылетах руки, погрешности позиционирования и др.).

ГОСТ 25204 – 82 для промышленных роботов за исключением технологических устанавливает значения рядов, приведенные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Ряды грузоподъемности промышленных роботов

Группа промышленных роботов	Значение номинальной грузоподъемности, кг
Сверхлегкие	0,08 [*] ; 0,16 [*] ; 0,32 [*] ; 0,40; 0,50; 0,63 [*] ; 0,80; 1,00
Легкие	1,25 [*] ; 1,60; 2,00; 2,50 [*] ; 3,20; 4,00; 5,00 [*] ; 6,30; 8,00; 10,00 [*]
Средние	12,5; 16,0; 20,0 [*] ; 25,0; 32,0; 40,0 [*] ; 50,0; 63,0; 80,0 [*] ; 100,0; 125,0; 160,0 [*] ; 200,0
Тяжелые	250; 320 ⁸ ; 400; 500; 630 [*] ; 800; 1000
Сверхтяжелые	1250 [*] ; свыше 1250 значения номинальной грузоподъемности устанавливаются по ряду R 10 ГОСТ 8032 – 84
Примечание: Символом «*» отмечены предпочтительные значения	

Для обозначения моделей промышленных роботов ЭНИМС предложил следующую маркировку. В этой системе буквенные и цифровые индексы определяют следующее:

ПР М 40 П 81 01

- Код конструктивного исполнения (00, 01, ... 99) (число рук, величины ходов, наличие дополнительных механизмов и т.п.)
- Код компоновочной схемы (00, 01, ... 99)
- Тип системы управления: Ц - цикловая, П - числовая позиционная, К - контурная, У - универсальная (для моделей, управляемых оператором, индекс опускается)
- Числовое значение грузоподъемности (кг) по принятому ряду
- Вид оборудования в соответствии с классификацией по видам производства (например, ЛМ, КМ и т.д.). Для обозначения ПР агрегатно-модульной конструкции используется индекс «А», который ставится после обозначения вида оборудования
- ПР – промышленный робот

Манипуляторы одной группы могут иметь различное и конструктивное исполнение и различные компоновочные схемы, которым присваивается индекс (двухзначное число). Первое число кода компоновки соответствует номеру группы. Код конструктивного исполнения манипулятора ПР определяется следующими конструктивными признаками: мобильностью (стационарные и передвижные), типом и конструкцией опорной системы (портальные, напольные, рельсовые), числом рук (однорукие, двурукие, многорукие), числом степеней подвижности кисти рук, числом схватов и т. д.

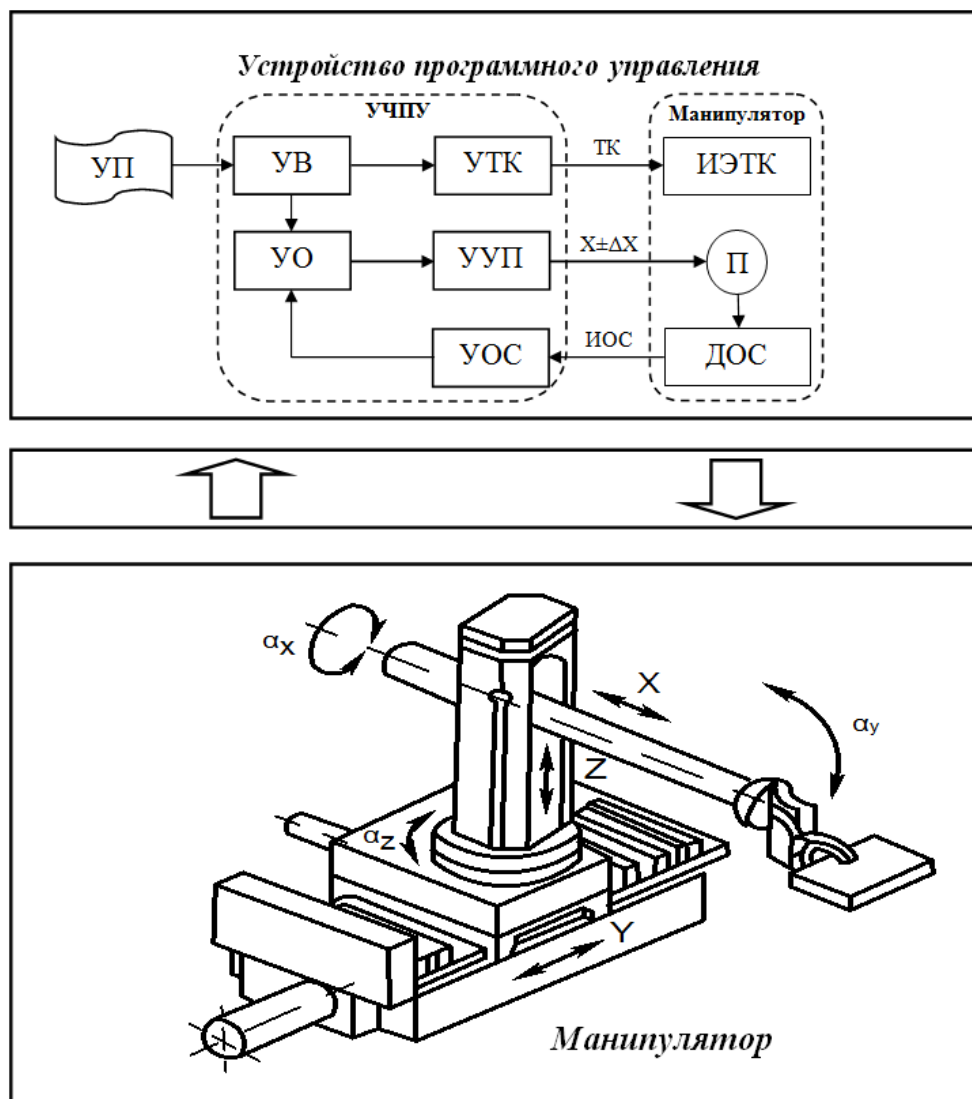
Контрольные вопросы

- 1 Назовите основную задачу создания промышленных роботов?
- 2 Что такое комплексная автоматизация?
- 3 Назовите основную проблему роботизации производства.
- 4 Перечислите области, где применяют роботы.
- 5 Дайте определение понятию «Промышленный робот (ПР)».
- 6 Что из себя представляет роботизированная техническая система (РТС)?
- 7 Дайте классификацию РТС.
- 8 Что такое «Информационные (управляющие) РТС»?
- 9 Область применения мобильных РТС?
- 10 Классификация манипуляционных робототехнических систем?
- 11 В чём отличие между роботами первого и третьего поколения?
- 12 В соответствии с чем определяют тип робота?
- 13 Перечислите основные признаки промышленных роботов.
- 14 Область применения технологических промышленных роботов?
- 15 Перечислите системы основных координатных перемещений ПР.
- 16 В чём различие между линейной и ангулярной (угловой) системой?
- 17 Назовите формы задания информации ПР.
- 18 В чём заключается суть аналоговых систем программного управления ПР?
- 19 Объясните маркировку моделей ПР предложенную ЭНИМС.

2 Структура промышленных роботов

2.1 Основные элементы

Исходя из определения промышленного робота, изначально в соответствии с рисунком 2.1, его структуру можно представить в виде двух крупных основных частей (структурных элементов): исполнительного устройства, т.е. механической системы, называемой манипулятором, и устройства программного управления.



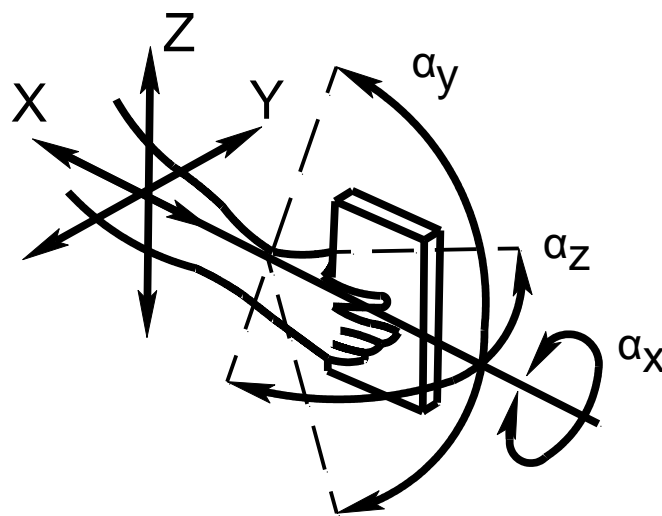
УП - управляющая программа; УВ - устройство ввода; УО - устройство обработки; УУП - устройство управления приводом; УТК - устройство технических команд; УОС - устройство обратной связи; ИЭТК - исполнительные элементы технологических команд; П - привод; ДОС - датчик обратной связи; ТК - технологическая команда; ИОС - информация обратной связи.

Рисунок 2.1 – Структура промышленного робота

В соответствии с тем же стандартом (ГОСТ 25686 – 85) манипулятор, как показано на рисунке 2.2 - это управляемое устройство или машина для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объекта в пространстве, оснащенное рабочим органом.



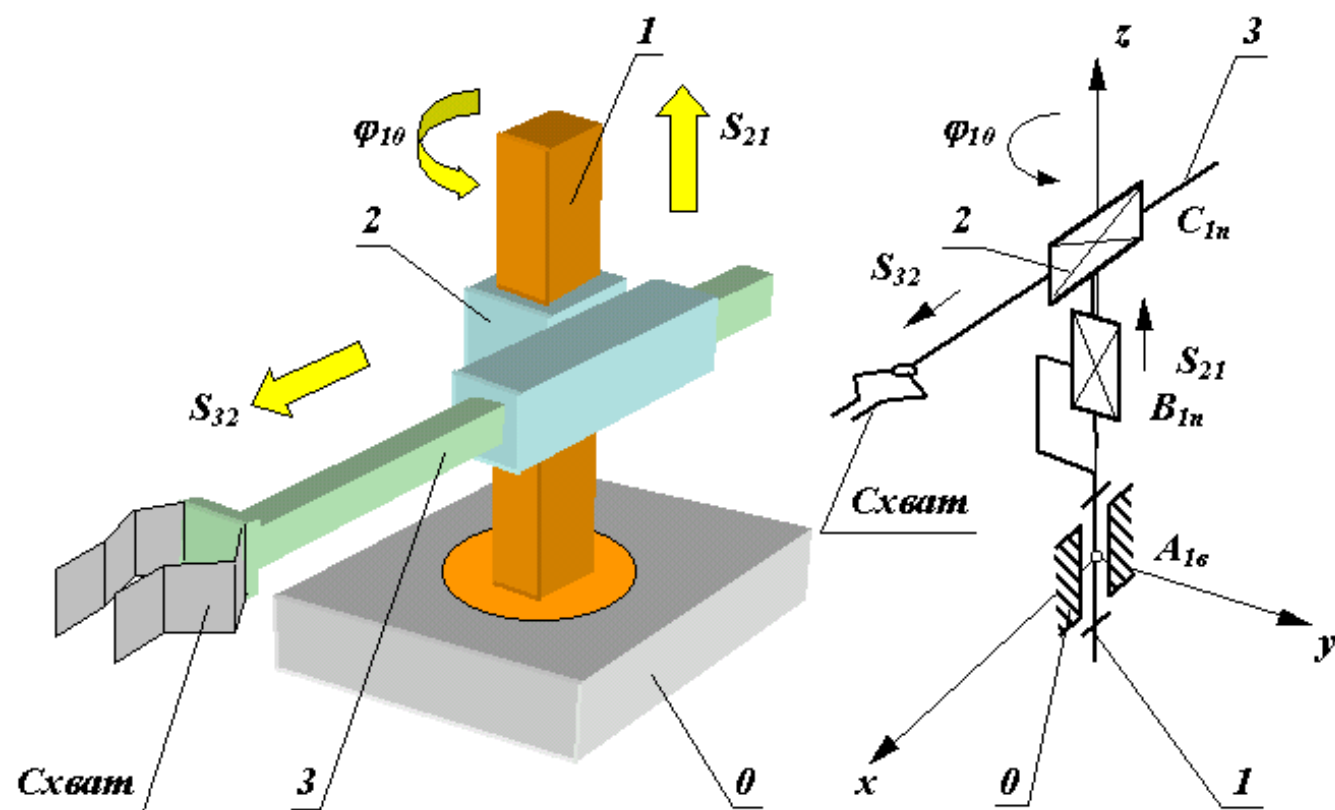
a)



b)

Рисунок 2.2 – Аналогия между двигательными функциями манипулятора (a) и рукой человека (б)

Функциональное назначение манипулятора промышленного робота заключается в обеспечении движений выходного звена и, закрепленного на нем, рабочего органа в пространстве по заданной траектории и с заданной ориентацией. Основной рычажный механизм манипулятора может обеспечить полное соответствие этому условию лишь при наличии не менее чем шести управляемых степеней подвижности (свободы). В этом случае ПР представляет собой дорогую и достаточно сложную как в изготовлении, так и в эксплуатации автоматическую систему. В целях снижения стоимости и сложности ПР, по возможности, стремятся использовать механические системы с меньшим числом степеней свобод. Так наиболее простые манипуляторы обладают тремя, как, например, на рисунке 2.3, реже двумя, степенями подвижности, что существенно снижает стоимость их изготовления и эксплуатации.



A_{1B} – одноподвижная вращательная кинематическая пара; B_{1n} и C_{1n} – одноподвижные поступательные кинематические пары.

Рисунок 2.3 – Структурно-кинематическая схема и структура трехподвижного рычажного механизма манипулятора

Механизм этого манипулятора соответствует цилиндрической системе координат. В этой системе звено 1 может вращаться относительно звена 0 (относительное угловое перемещение φ_{10}), звено 2 перемещается по вертикали относительно звена 1 (относительное линейное перемещение S_{21}) и звено 3 перемещается в горизонтальной плоскости относительно звена 2 (относительное линейное перемещение S_{32}). На конце звена 3 укреплено захватное устройство или схват, предназначенный для захвата и удержания объекта манипулирования при работе манипулятора. Звенья основного рычажного механизма манипулятора образуют между собой три одноподвижные кинематические пары (одну вращательную А и две поступательные В и С) и могут обеспечить перемещение объекта в пространстве без управления его ориентацией. Для выполнения каждого из трех относительных движений манипулятор должен быть оснащен приводами, которые состоят двигателей с редуктором и системы датчиков обратной связи. Так как движение объекта осуществляется по заданному закону движения, то в системе должны быть устройства, сохраняющие и задающие программу движения, которые назовем программносителями. При управлении от ЭВМ такими устройствами могут быть дискеты, диски CD, магнитные ленты и др. Преобразование заданной программы движения в сигналы управления двигателями осуществляется системой управления. Эта система включает ЭВМ, с соответствующим программным обеспечением, цифро-аналоговые преобразователи и усилители. Система управления, в соответствии с заданной программой, формирует и выдает на исполнительные устройства приводов (двигатели) управляющие воздействия u_i . При необходимости она корректирует эти воздействия по сигналам Δx_i , которые поступают в нее с датчиков обратной связи. Функциональная схема промышленного робота приведена на рисунке 2.4.

При этом соответствие функциональному назначению подобных механизмов невозможно без соблюдения таких специфических требований к организации внешней (рабочей) среды как обеспечение строгой определенности расположения и ориентации оборудования и объектов манипулирования относительно робота. Это, в свою очередь, определяет некоторый рост временных и материальных затрат на эксплуатацию.

Отметим, что число степеней свободы системы представляет собой минимальное число независимых величин необходимых для полного определения поло-

жения всех ее точек в изучаемом пространстве. Что же касается механической системы, то ее числом степеней свободы или (что – то же самое) числом степеней подвижности (подвижностью) называют число независимых между собою возможных перемещений (движений) системы.

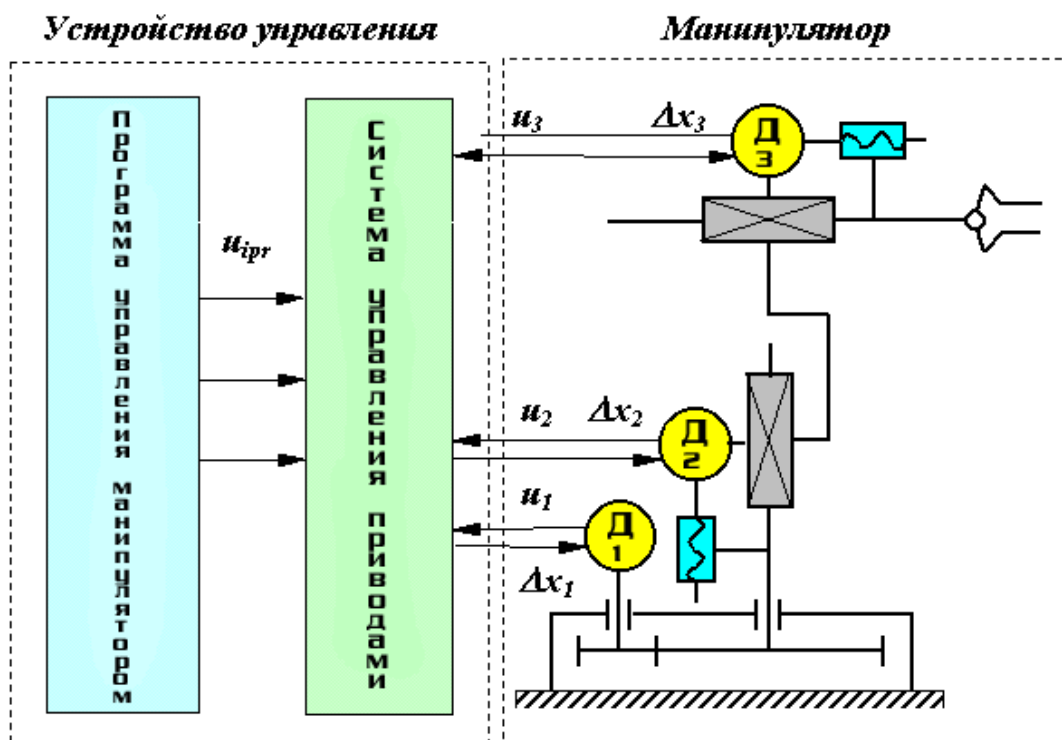


Рисунок 2.4 – Функциональная схема промышленного робота

Иными словами число степеней подвижности (свободы) ПР определяется количеством возможных независимых перемещений его рабочего органа вдоль или вокруг координатных осей. В понятие степени подвижности не входит движение захвата объекта манипулирования. Определяют число степеней подвижности W по формуле Соскова-Малышева:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (2.1)$$

где n – число подвижных звеньев кинематической цепи;

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 – число кинематических пар, соответственно V, IV, III, II и I класса.

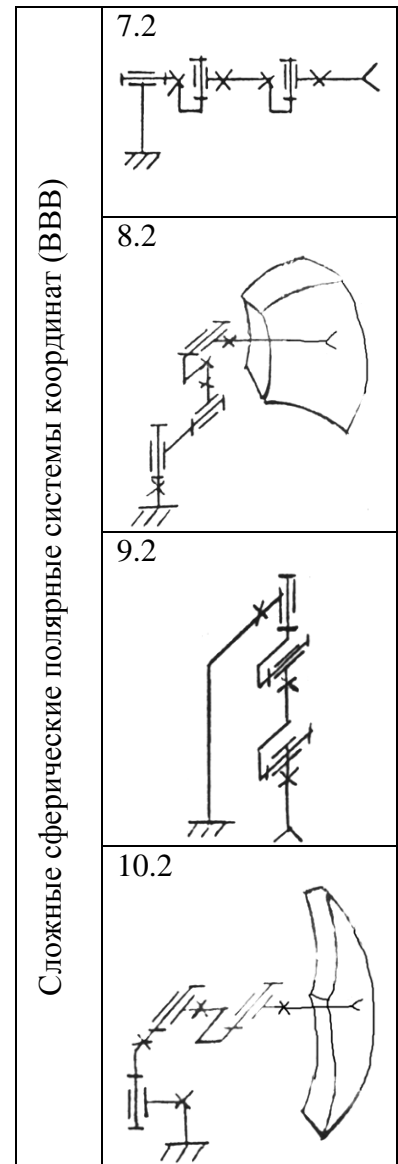
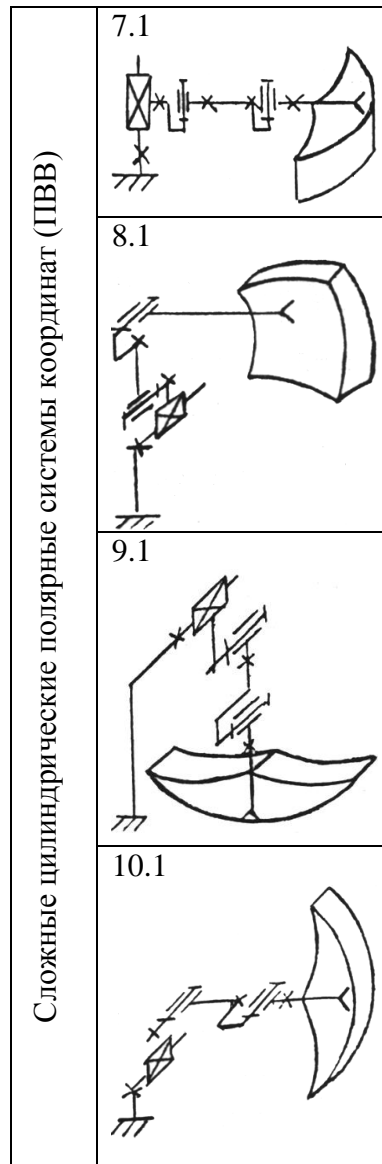
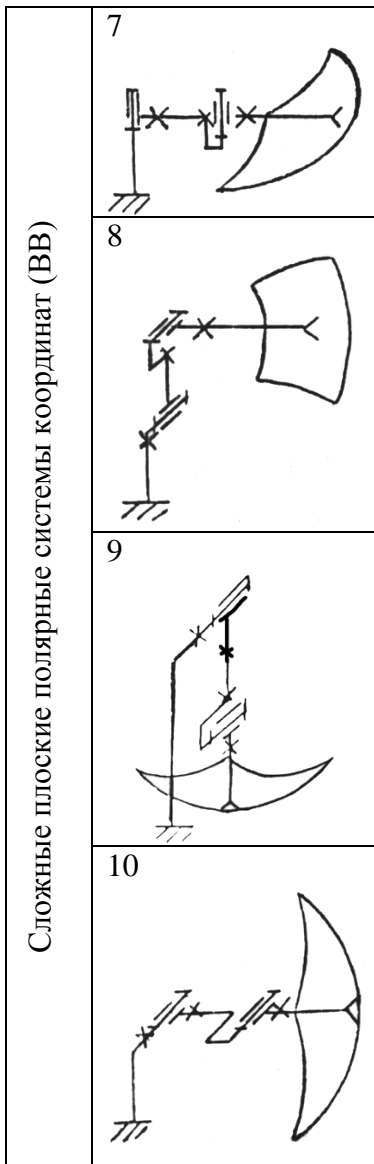
Условные графические обозначения кинематических пар, применяемые для изображения структурно-кинематических схем ПР, приведены в таблице 2.1. В таблице 2.2 представлены структурные кинематические схемы промышленных роботов.

Таблица 2.1 – Условные графические обозначения (УГО) элементов структурно-кинематических схем промышленных роботов и манипуляторов

Элемент	УГО	Характеристика
Звено		–
Жесткое закрепление звена (стойки)		Движение отсутствует
Жесткое соединение звеньев		
Подвижное соединение с перемещением вдоль прямолинейных направляющих		Возможно возвратно-поступательное движение (одноподвижная поступательная кинематическая пара V класса)
Винтовое подвижное соединение		Возвратно-поступательное движение и взаимосвязанное вращательное движение (одноподвижная поступательно-вращательная кинематическая пара V класса)
Цилиндрическое соединение звеньев		Возвратно-поступательное движение и независимое вращение вокруг продольной оси (цилиндрическая кинематическая пара IV класса)
Плоское шарнирное соединение звеньев		Вращение вокруг поперечной оси (вращательная кинематическая пара V класса)
Шаровой шарнир с пальцем		Вращение вокруг двух осей (вращательная пара IV класса)
Шаровой шарнир		Вращение вокруг трех осей (вращательная пара III класса)
Захватное устройство		Зажимные элементы подвижны
		Зажимные элементы неподвижны

Таблица 2.2 – Структурные кинематические схемы промышленных роботов

Плоская прямоугольная система координат (ПП)	1	
	2	
	3	
Плоская полярная система координат (ВП)	4	
	5	
	6	
Объёмная прямоугольная система координат (ПП)	1.1	
	2.1	
	3.1	
Цилиндрическая система координат (ВП)	1.2	
	2.2	
	3.2	
Цилиндрическая система координат (ВП)	4.1	
	5.1	
	6.1	
Сферическая система координат (ВВП)	4.2	
	5.2	
	6.2	



Прежде чем рассматривать строение механической системы промышленного робота (манипулятора) отметим то, что реализуемые ею движения, обеспечивающие перемещения полезной нагрузки по степеням подвижности, структурируются следующим образом: координатные (глобальные), транспортирующие (региональные)

и ориентирующие (локальные). К координатным движениям относят те, которые перемещают рабочий орган робота (далее по тексту для простоты – захватное устройство или схват) на расстояния, превышающие размеры промышленного робота. Примером такого движения может служить движение вдоль оси «Y» на рисунке 2.1, при условии, что его величина превышает размеры промышленного робота.

Транспортирующими движениями называют движения рабочего органа (РО) манипулятора ПР на расстояния соизмеримые с размерами его руки и ограниченные размерами самого манипулятора. На рисунке 2.1 в качестве этих движений можно указать движения вдоль осей «X», «Z» и « α_Z », а на рисунке 2.3 – «X», «Y» и «Z». Ориентирующие движения - это движения ЗУ соизмеримые с его размерами. На рисунке 2.1 это движения « α_X », « α_Y », а на рисунке 2.2 это движения « α_X », « α_Y », и « α_Z ».

Определимся сразу со смысловой нагрузкой употребленных нами терминов рабочий орган, захватное устройство и рабочее пространство промышленного робота (манипулятора).

ГОСТ 25686 – 85 определяет рабочий орган промышленного робота как составную часть его устройства для непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов. Например, окрасочный пистолет, сварочные клещи, захватное устройство.

В соответствии с этим же стандартом рабочее пространство манипулятора (автооператора, промышленного робота) – пространство, в котором может находиться исполнительное устройство при функционировании манипулятора (автооператора, промышленного робота).

Исполнительное же устройство ПР (автооператора) ГОСТ 25686 – 85 определяет как устройство промышленного робота (автооператора), выполняющее все его двигательные функции.

Захватное устройство промышленных роботов предназначены для захватывания и удержания в определенном положении объектов манипулирования, которыми могут быть технологическая оснастка, заготовка, инструмент и т.д.

Вернемся к рассмотрению рисунка 2.3, на котором приведена схема трехпо-
движного манипулятора. Механизм руки этого манипулятора образован неподвиж-

ным звеном 0 , и тремя подвижными звеньями $1, 2, 3$. Звенья 0 и 1 образуют одноподвижную вращательную кинематическую пару, в результате чего звено 1 может поворачиваться относительно звена 0 , обеспечивая относительное угловое перемещение φ_{10} . Звеньями 1 и 2 , а так же 2 и 3 образованы две одноподвижные поступательные кинематические пары, реализующие перемещения звеньев 2 и 3 в вертикальной S_{21} и горизонтальной S_{32} плоскостях, соответственно. Таким образом, звенья руки, которую принято еще называть основным рычажным механизмом манипулятора, образуют между собой три одноподвижные кинематические пары (одну вращательную A и две поступательные B и C), составляющие полярную систему координатных перемещений, обеспечивающую транспортирование объекта в пространстве цилиндрической системы координат без управления его ориентацией.

Для обозначения кинематических пар в структурно-кинематических схемах промышленных роботов используют заглавные буквы английского алфавита, которые снабжаются индексами, образованными цифрой, означающей число степеней подвижности пары, и буквой, являющейся первой буквой слова обозначающего вид, совершаемого простого движения (вращательное, поступательное). Для выполнения каждого из трех относительных движений манипулятор необходимо оснастить приводами, в состав которых могут входить двигатели, редукторы и датчики обратной связи.

На звене 3 крепится захватное устройство (схват), предназначенное для захвата и удержания объекта манипулирования при работе манипулятора. В результате образуется кисть. Подвижность соединения ЗУ с звеном 3 , формируемая кинематическими парами между звеном и схватом определяет степени свободы кисти. В данном случае – соединение жесткое, исключая ориентированные движения.

Представленная классификация движений манипулятора определяет его функциональную схему, приведенную на рисунке 2.5 [6].

В соответствии с функциональной схемой манипулятора в его кинематике существуют участки, различающиеся функциональным назначением. Один из этих участков носит название «руки», а другой – «кисти». «Рукой» является часть мани-

пулятора, реализующая транспортирующие движения. «Кисть» обеспечивает выполнение ориентирующих движений.

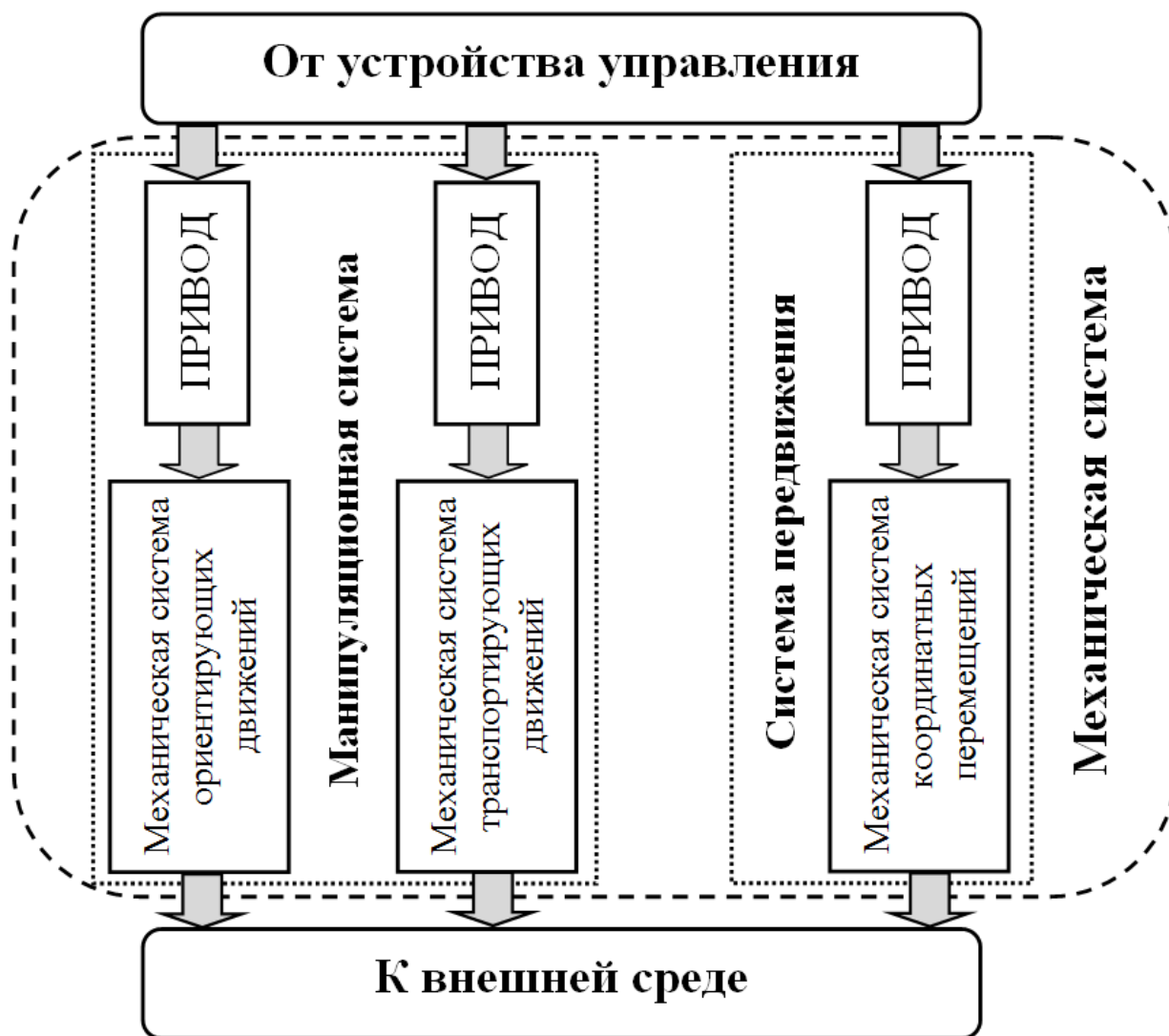


Рисунок 2.5 – Функциональная схема механической системы промышленного робота

Поскольку перемещение объекта должно осуществляться по заданному закону движения робот так же должен иметь систему управления приводами.

2.2 Приводы

С конструктивной точки зрения механическая система, собственно и называемая манипулятором, представляющая собой пространственный механизм с разо-

мкнутой кинематической цепью, состоит из несущей конструкции, приводов, передаточных и исполнительных механизмов и захватных устройств.

Поскольку манипулятор, подобно руке человека, может иметь различное количество степеней свободы (от двух до двенадцати), то и число возможных вариантов реализации кинематических схем основного рычажного механизма (рук) роботов тоже достаточно велико.

Синтез механической системы ПР сопряжен с необходимостью соблюдения разнообразных специфических условий функционирования его кинематики таких, например, как управляемость всех степеней подвижности. Помимо различий в распределении степеней подвижности вдоль руки должны учитываться и различия в соотношениях значений геометрических параметров отдельных звеньев манипулятора. При этом компоновка механической системы ПР должна обеспечивать захват им объекта манипулирования в любой требуемой точке рабочей зоны при необходимой ориентации ЗУ.

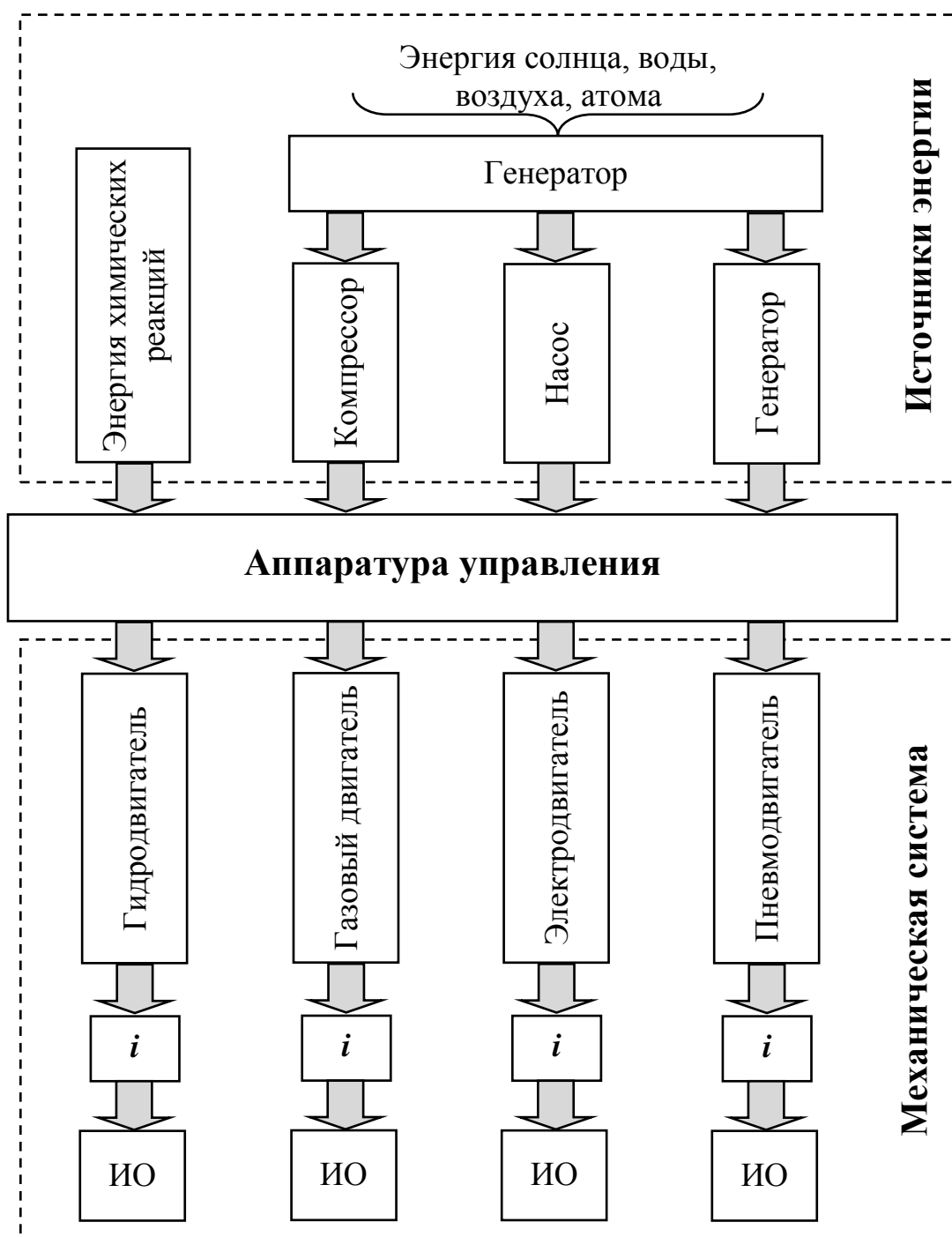
Структура системы, приводящей в движение рабочие органы рабочих машин, в общем случае, как известно, образована устройством управления, получающим сигнал от задатчика, преобразовательным устройством (источник движения или исполнительный двигатель), преобразующим какой либо вид энергии в механическую, и передаточным устройством, обеспечивающим передачу механической энергии от исполнительного двигателя (ИД) к подвижному звену кинематической пары и согласование вида и параметров его движения с видом и параметрами движения ИД. Передаточное устройство реализуется механическими элементами, образующими механическую кинематическую цепь (КЦ).

Спектр достаточно жестких и специфических требований, предъявляемых к приводам промышленных роботов, широк. Он определяется различием систем, реализующих координатные, транспортирующие и ориентирующие движения, а так же требованиями к этим системам. В робототехнике используются различные варианты компоновок приводов. Приоритетность конкретного варианта определяется требованиями к динамическим характеристикам, жесткости, точности и экономической эффективности. Допустим для приводов малой подвижности, т. е. при небольшой

грузоподъемности выгодно устанавливать их непосредственно в кинематических парах (шарнирах или как их еще называют суставах) или на звеньях. Для более мощных приводов предпочтительна компоновка в едином блоке, располагаемом на корпусе манипулятора. В этом случае для соединения источников движения с исполнительными кинематическими парами используются дополнительные передачи (тросовая, реечная или сельсинная). Кроме названных применяют и комбинированный вариант компоновки приводов. Встраивание приводов в исполнительные системы ПР — манипуляторы и системы передвижения определяет требование минимизации их габаритов и масс. Необходимость максимального уменьшения времени колебаний или полного их исключения из переходных процессов обусловлена работой приводов промышленных роботов в основном в неустановившихся режимах и с переменной нагрузкой. Не менее важными, чем для приводов других машин, для приводов роботов являются и требования надежности, стоимости, удобства эксплуатации. Требования к роботу, в целом, определяют и требования к способу управления, быстрдействию и точности, приводов. Например, диапазон регулирования скорости перемещений подвижного звена ПР может ограничиваться значениями от долей метров до нескольких метров в секунду. Требуемая же точность отработки перемещения может составлять доли миллиметра.

В роботах нашли применение практически все известные типы приводов: электрические, гидравлические и пневматические; с поступательным и вращательным движением; регулируемые (по положению и скорости) и нерегулируемые; замкнутые (с обратной связью) и разомкнутые; непрерывного и дискретного действия (в том числе шаговые). Обобщенная функциональная схема привода промышленных роботов приведена на рисунке 2.6 [10].

Привод ПР — это механизмы перемещения, обеспечивающие движение ПР и его элементов. В совокупности приводы манипуляторов — двигательная система роботов. Состоят они из силовых двигателей, передаточных механизмов, усилительно-преобразовательных устройств и датчиков перемещения исполнительных звеньев.



i – механические передачи, образующие кинематические цепи; ИО – исполнительный орган (подвижное звено исполнительный кинематической пары).

Рисунок 2.6 – Обобщенная функциональная схема привода

Тип привода ПР определяется, с одной стороны, условиями функционирования, грузоподъемностью и требованиями к его управляемости. С другой же стороны, тип привода ПР определяется видом энергии, используемой для работы его исполнительных механизмов. Различают электрический, пневматический, гидравлический

ский и комбинированный приводы. Выбор типа привода зависит от функционального назначения и условий эксплуатации ПР (пожаро- и взрывобезопасность, защищенность и невосприимчивость к отдельным видам помех), от требований к способу управления и регулирования, вида системы управления, грузоподъемности и требуемых динамических характеристик конструкции, способа регулирования, требований технологического процесса. На выбор привода также может оказать влияние его компоновочная схема: расположение силовых двигателей (в едином блоке, на исполнительных звеньях, комбинированная).

К общим требованиям к приводам промышленного робота относятся:

- минимальность габаритных размеров;
- высокие удельные энергетические показатели (большая развиваемая мощность при малой массе);
- возможность работы в автоматическом режиме управления и регулирования при минимальном времени переходных процессов с обеспечением оптимальных режимов разгона и торможения;
- малая масса элементов и высокий КПД всей конструкции;
- широкий диапазон регулирования скоростей, характеристики с большим запасом устойчивости и плавности движения;
- быстроедействие – движение исполнительного механизма с высокими скоростями и минимальными погрешностями позиционирования;
- обеспечение безопасности (путем минимизации времени торможения, легкости отключения привода и снятия прикладываемых усилий, блокирования привода при сохранении положений исполнительных механизмов при выполнении команды «стоп»);
- возможность встраивания систем охлаждения и терморегулирования для обеспечения тепловых режимов работы привода и стабильности его характеристики;
- надежность и долговечность конструкции;
- удобство монтажа, обслуживания, ремонта, переналадки;
- низкий шум;
- экономичность расхода энергоносителя при высоком КПД;

- невысокую стоимость и др.

По функциональному признаку приводы ПР делятся на регулируемые и следящие. Регулируемые приводы работают, в основном, с ЦПУ (цикловым программным управлением). Следящие приводы – с ЧПУ и применяются тогда, когда необходима фиксация движения в любой точке.

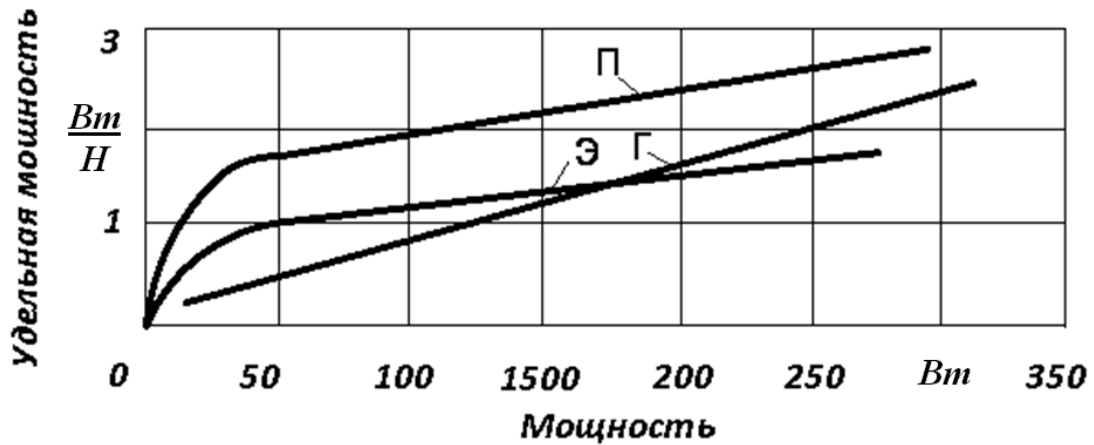
Исполнительные приводы поставляются всегда комплектно, например, комплектно гидравлический привод состоит из гидромотора или цилиндра, системы регулирования скоростей и мощности, блоков обратной связи по скорости и мощности, а также надежные быстродействующие тормозные устройства. В качестве двигателей применяются цилиндры. При этом применяются, в основном, для возвратно-поступательных и поворотных движений. Кроме того, применяются поршневые двигатели.

Для электроприводов используют специальные двигатели с электромагнитным тормозом и управлением от ЧПУ, обеспечивающие многопозиционное или контурное управление. В малых и средних роботах применяются высокомоментные шаговые приводы. Электроприводы комплектуют шаговыми и линейными двигателями.

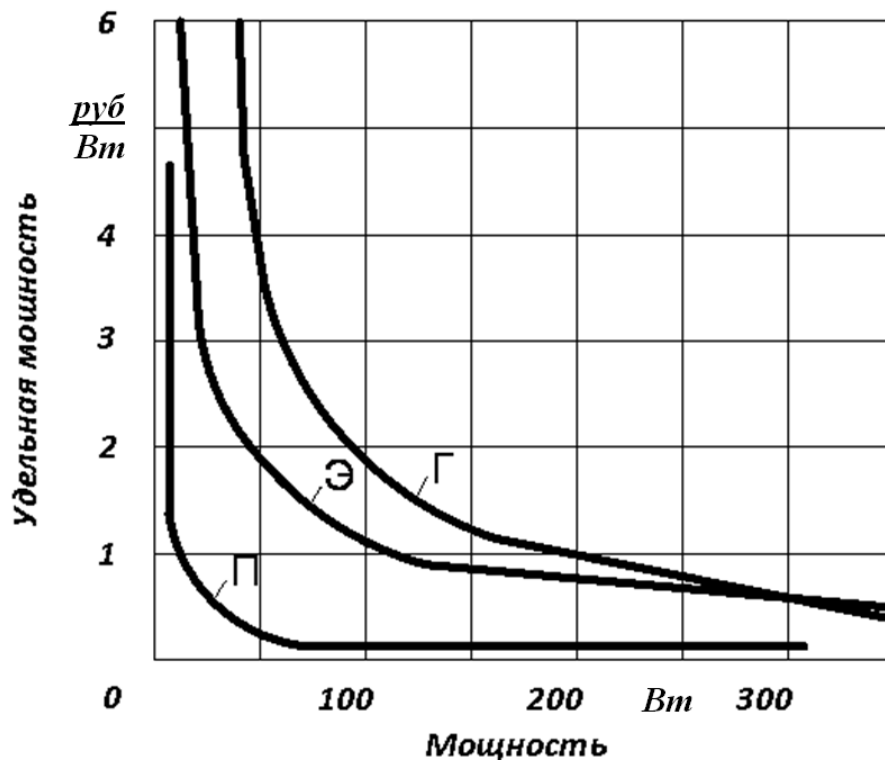
Относительная простота и надежность конструкции, доступность энергии сжатого воздуха или газа, отсутствие возвратных линий и невысокая стоимость способствуют широкому использованию пневмопривода для ПР легкой и средней грузоподъемности до 10-ти, реже 20-ти килограмм. Недостатками же ограничивающими применение этого типа приводов являются низкий КПД, недостаточная жесткость характеристик из-за значительной сжимаемости воздуха или газа, плохая управляемость и низкое быстродействие пневматических систем управления. Поэтому в основном они используются как не регулируемые в комплекте с цикловыми системами программного управления.

Гидравлические приводы являются более сложными и дорогими. Однако простота реализации бесступенчатого регулирования скоростей ИО, малая инерционность и компактность, возможность организации следящих систем с высоким быстродействием, а также наилучшее, как следует из приведенных на рисунке 2.7 зависимостей, соотношение массогабаритных характеристик и удельной стоимости в

диапазоне от 500 до 1000 Вт и выше определяют их использование в качестве основного типа привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов. Хорошая управляемость гидравлических приводов при наличии высококачественных динамических характеристик способствует их применению и в работах средней грузоподъемности.



а)

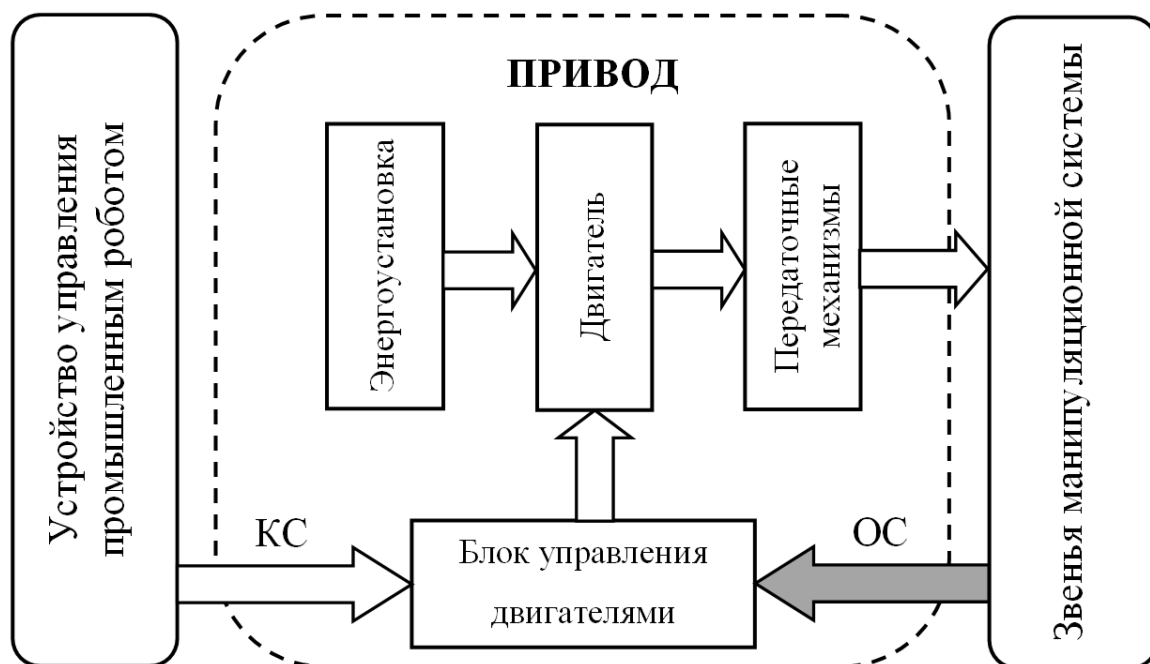


б)

Рисунок 2.7 – Обобщенные зависимости удельных мощности (а) и стоимости (б) электрических Э, пневматических П и гидравлических Г приводов в функции их абсолютной мощности

Электрический привод при его хорошей управляемости, большом КПД, простоте и удобстве эксплуатации и экономичности уступает по массогабаритным показателям приводам других видов, приобретающим особую значимость при разработке специализированных ПР грузоподъемностью более 50-ти килограмм. Сегодня основной областью применения электрических приводов в робототехнике являются мобильные ПР, легкие роботы с высококачественным управлением и промышленные роботы средней грузоподъемности. Создание новых типов электрических двигателей, специально предназначенных для ПР, позволяющих создавать более компактные комплектные приводы всех типов, способствует прогрессивному росту доли электрических приводов используемых в робототехнике.

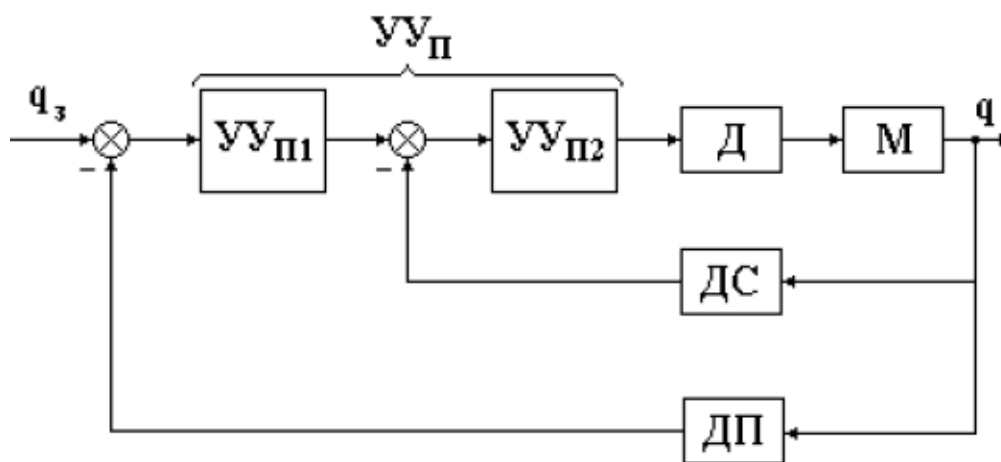
В общем случае, структура привода образована устройством управления, состоящим из информационной и силовой частей, двигателя, передаточного устройства, выполняющего передачу механического движения от двигателя к исполнительному органу и согласование видов их движений и их параметров. Общая структура привода промышленного робота может быть проиллюстрирована схемой, приведенной на рисунке 2.8.



КС - канал связи; ОС - обратная связь.

Рисунок 2.8 – Общая структура привода промышленного робота

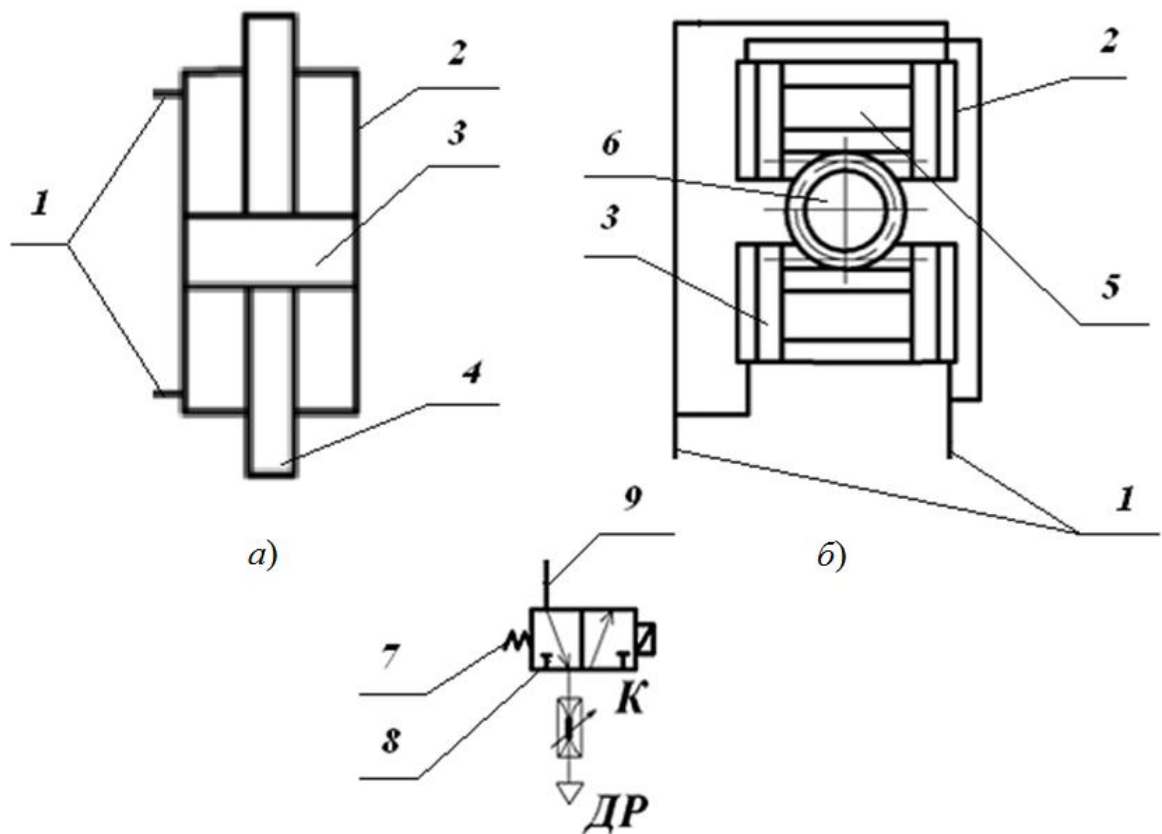
Соответствующая типовая структура привода манипулятора показана на рисунке 2.9. Кроме общей обратной связи по положению, схему дополняет обратная связь по скорости, роль которой – корректирующая гибкая обратная связь и, зачастую, управление скоростью. Если исполнительная механическая система редуцирует скорость, то датчик скорости ставят иначе, чем показано на схеме. Его устанавливают на выходе двигателя до механизма передачи движения. Это позволяет увеличить снимаемый с датчика сигнал по скорости. Устройство управления приводом может быть непрерывного действия, релейным, импульсивным или цифровым.



Д - двигатель; *М* - механизм передачи и преобразования перемещения; *ДП*, *ДС* - датчики положения и скорости, соответственно; *УУ_П*, *УУ_{П1}* и *УУ_{П2}* - устройство управления приводом и две его части: информационная и силовая, соответственно.

Рисунок 2.9 – Типовая схема приводов манипуляторов

Пневмопривод одной степени подвижности образован двигателем, распределительным устройством и регулятором скорости. Двигатель может быть либо поступательного движения - пневмоцилиндр, либо поворотный. Для изготовления пневмоцилиндра используют прецизионную трубу, как правило, с фторопластовой накладкой внутри, снижающей трение между поверхностью гильзы цилиндра и уплотнением поршня. К пневмоцилиндру часто пристроен тормоз, включающийся в конце хода поршня. Через шток поршень передает движение от двигателя, в соответствии с рисунком 2.10.



1 – трубопровод подвода/отвода сжатого воздуха; 2 - корпус пневмоцилиндра; 3 - поршень; 4 - шток; 5 - шток-рейка; 6 - зубчатое колесо; 7 - пружина; 8 - отвод воздуха в атмосферу; 9 - трубопровод подачи сжатого воздуха к двигателю; К - клапан подключения двигателя к системе сжатого воздуха и к атмосфере; ДР - дроссель регулирования скорости подачи сжатого воздуха.

Рисунок 2.10 – Примеры схем элементов поступательного (а) и вращательного (б) пневмодвигателей

Направление движения поршня со штоком определяется подсоединением полостей цилиндра к нагнетающей сжатый воздух и стравливающей его в атмосферу ветвям. В роботах применяют поворотные пневматические двигатели с ограниченным углом поворота (неполноповоротные двигатели). Подвижная часть в виде лопасти, закрепленной на выходном валу, находится в кольцеобразном герметичном корпусе, разделенном перегородкой на две герметично изолированные друг от друга полости. Подаваемый воздух поворачивает перегородку. Существуют также поворотные пневматические двигатели, состоящие из пневмоцилиндров, на штоках ко-

торых закреплены или выполнены рейки, входящие в зацепление с зубчатым колесом, которое поворачиваясь при движении штока-рейки, передает движение дальше.

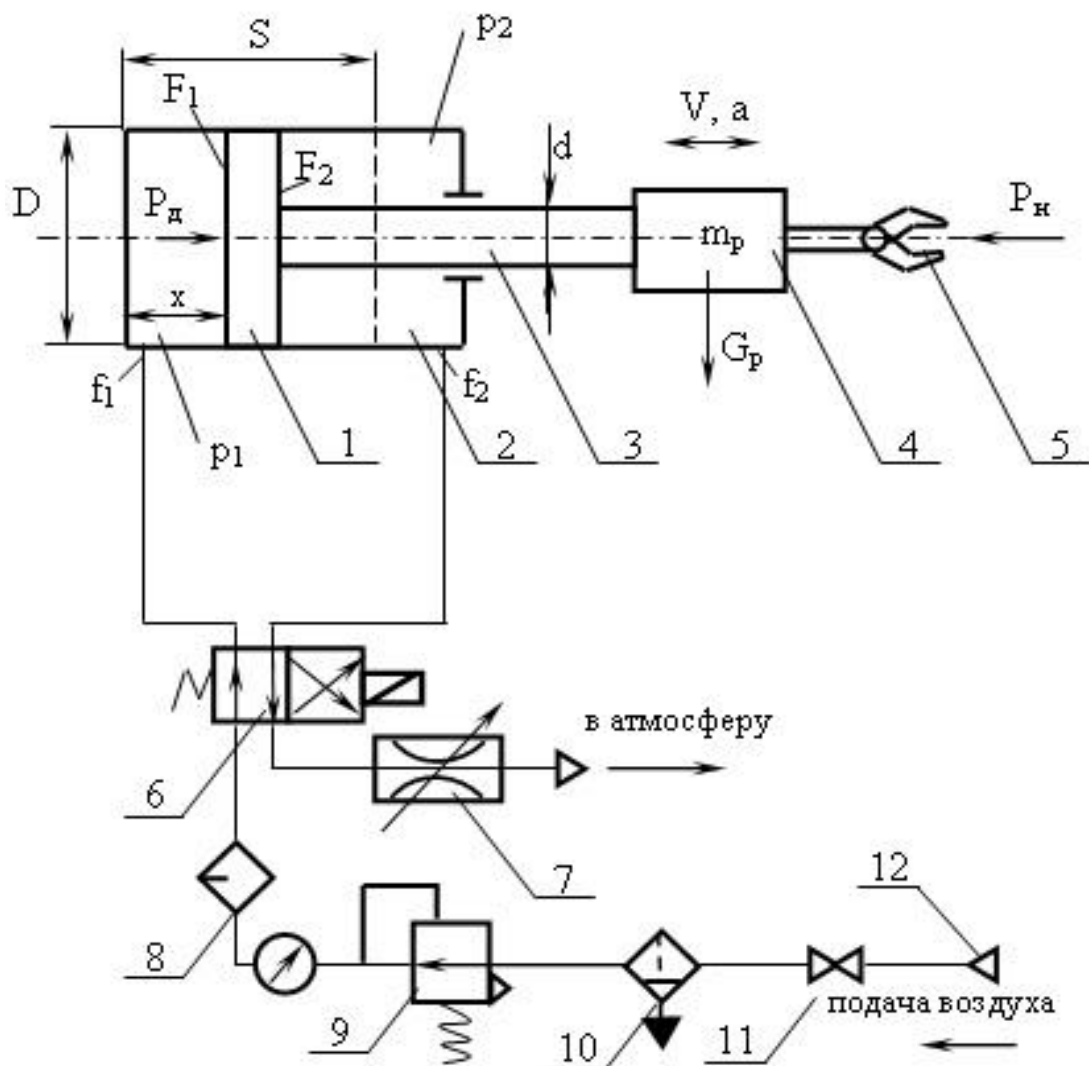
Распределительное устройство пневмопривода служит для управления подачей воздуха в двигатель. Выполняют его из золотников или клапанов обычно с электромагнитным приводом, управляющие сигналы на которые поступают от устройства управления робота.

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

Пневматические двигатели работают на сжатом воздухе давлением от 0,3 до 0,6 МПа. Сжатый воздух поступает на приводы от общего блока питания, который состоит из аппаратуры подготовки воздуха и редуктора. Подготовка воздуха заключается в его очистке от влаги и механических примесей и внесении распыленного масла для смазки трущихся поверхностей в двигателе. Редуктор обеспечивает поддержание определенного давления воздуха на входе привода. Сжатый воздух на вход блока питания поступает обычно из общей пневмосети, в которую он подается от компрессора (компрессорной станции). В мобильных роботах воздух поступает от баллонов, где он находится под повышенным давлением.

При простейшем цикловом управлении начальная и конечная точки перемещений определяются передвижными регулируемые механическими упорами, устанавливаемыми на подвижной части привода (на штоке пневмоцилиндра или выходном валу поворотного двигателя). Для обеспечения точности позиционирования и быстродействия устанавливают различные гидравлические или пружинные демпферы, обеспечивающие плавный выход в точку позиционирования. Иногда используют способ торможения противодействием путем переключения подачи воздуха из одной полости двигателя в другую – встречно движению поршня или лопасти в зависимости от двигателя. Использование таких схем приводов обеспечивает значительно более высокую точность (по сравнению с обычным позиционным управлением с обратной связью по положению) (погрешность менее 0,1 мм), высокое быстродействие и скорость перемещения до нескольких метров в секунду. Кроме того, ис-

пользуют конструкции с несколькими упорами, которые либо устанавливают по винтовой линии на поворотное устройство размещенное вдоль пневмоцилиндра (ба-
рабан с упорами) либо являются выдвжными, имеющими индивидуальные приво-
да. Дискретность таких систем ограничена величиной пути торможения, который
для скорости порядка 1 м/с может достигать 100 мм. Повышение точности позицио-
нирования в промежуточных точках эти приводы укомплектовывают тормозом
(например, электромагнитным).

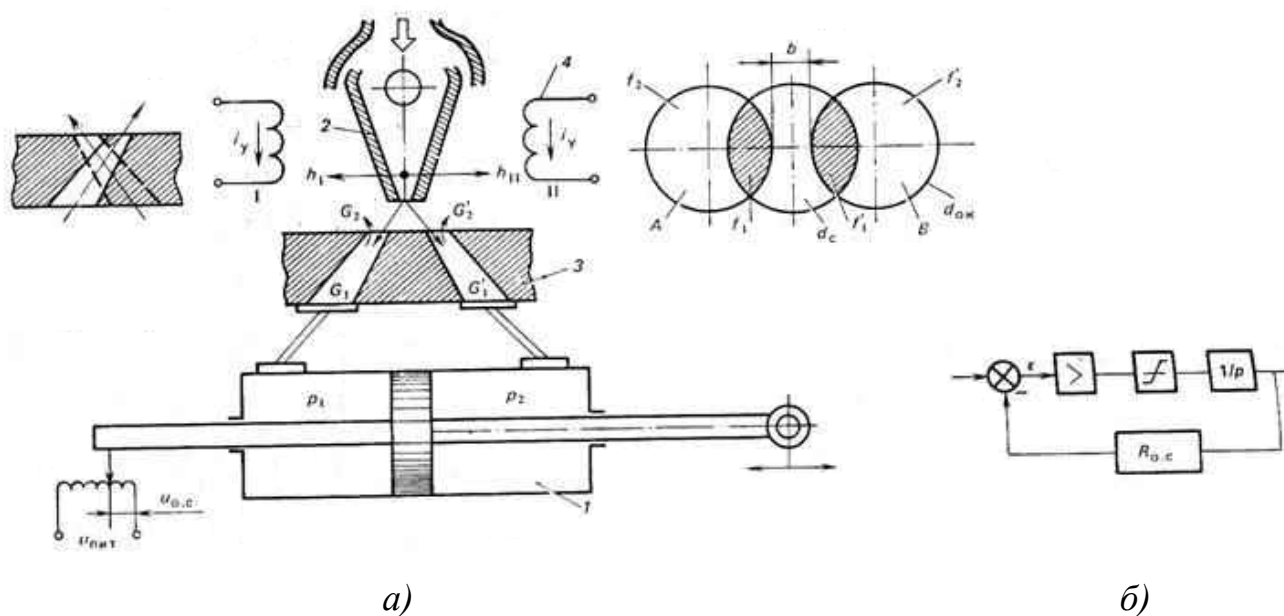


1 - поршень; 2 - цилиндр; 3 - шток; 4 - рука; 5 - схват; 6 - распределитель; 7 - дрос-
сель; 8 - маслораспылитель; 9 - редукционный клапан (регулятор давления); 10 - вла-
гоотделитель; 11 - запорный вентиль; 12 - входной штуцер.

Рисунок 2.11 – Типовая схема работы пневмопривода

Для дискретного позиционного пневмопривода используют еще один конструктивный вариант – дискретный привод, состоящий из последовательно соединенных цикловых пневмоприводов, имеющих различающееся вдвое значения перемещения. Различные комбинации их включения позволяют получать соответственно разное суммарное перемещение с конечным числом точек позиционирования, например, три таких привода дают в совокупности 8 точек позиционирования: четыре привода — 16 точек и т. д. [11]. Одна из типовых схем пневмопривода приведена на рисунке 2.11.

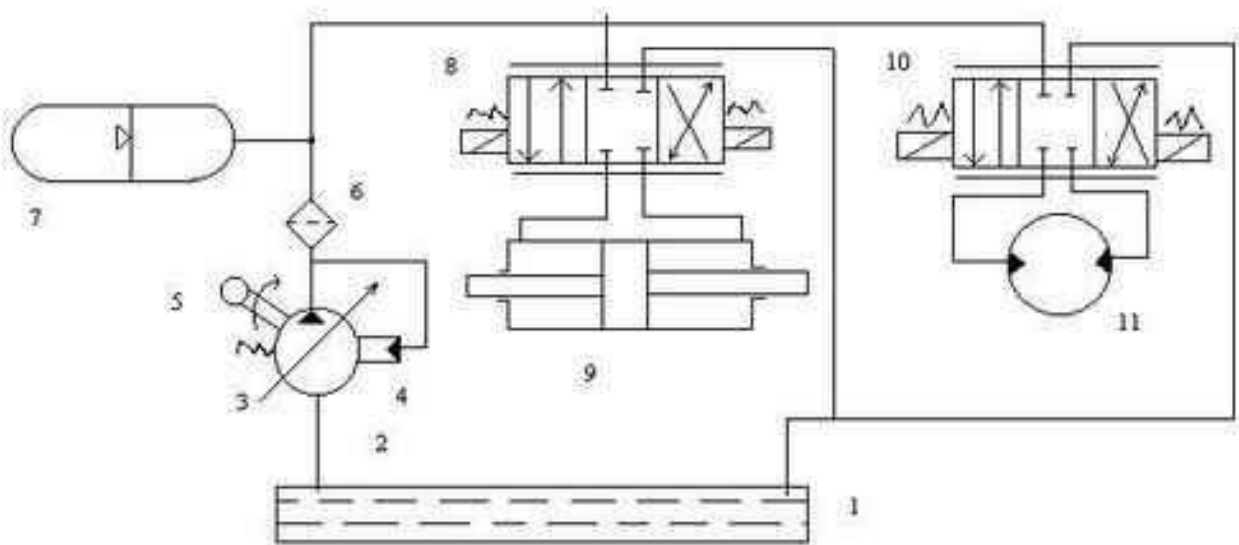
Пневмопривод позволяет реализовать и следящие схемы управления на базе, так называемой, струйной техники (пневмоники). Их применение ограничивается отсутствием жесткости их характеристик из-за сжимаемости энергоносителя (воздуха). Принципиальная схема такого пневмопривода приведена на рисунке 2.12.



1 - пневмоцилиндр; 2 - струйный механизм (распределяет сжатый воздух); 3 - сопла приемника; 4 - обмотка управления; \otimes - сумматор; $>$ - усилитель; f – нелинейный элемент с зоной насыщения ограничивает сигнал по величине; $1/p$ – интегрирующее устройство повышает точность срабатывания; $R_{0.c}$ - датчик обратной связи.

Рисунок 2.12 – Принципиальная (а) и структурная (б) схемы следящего пневмопривода с управлением по замкнутому циклу

Основным применением гидроприводов являются роботы средней грузоподъемности при необходимости обеспечения особо качественного управления, а так же тяжелые и сверхтяжелые роботы. Элементы гидропривода, в соответствии с рисунком 2.13, аналогичны элементам пневмопривода: двигатель поступательного движения (гидроцилиндр) или углового перемещения (поворотный гидродвигатель). Различие состоит в использовании вместо сжатого воздуха гидрожидкости (как правило, масла) подаваемого под давлением до 20 МПа. Это обеспечивает создание усилий на два порядка большее. Лучшие динамические показатели и показатели точности гидропривода обусловлены несжимаемостью жидкости. Это же свойство определяет простоту решения задачи реализации следящих систем и бесступенчатого регулирования скорости. Для управления гидравлическими двигателями тоже используются золотники и клапаны. Поскольку они, как правило, имеют электрическое управление, то их называют электрогидравлические усилители (ЭГУ). Управление гидроприводами, обычно непрерывное.



1 - емкость; 2 - фильтр; 3 - насос; 4 - регулятор подачи насоса; 5 - электродвигатель; 6 - фильтр тонкой очистки; 7 - пневмогидравлический аккумулятор (стабилизирует давление в нагнетающей магистрали); 8, 10 - золотниковый распределитель; 9 - силовой цилиндр; 11 - гидромотор.

Рисунок 2.13 – Пример схемы работы гидропривода

Отличие от пневмоприводов состоит в том, что гидроприводы имеют собственный блок питания, входящий в состав робота. Образован он гидронасосом, фильтром, регулятором давления, устройством охлаждения и емкостью для гидрожидкости.

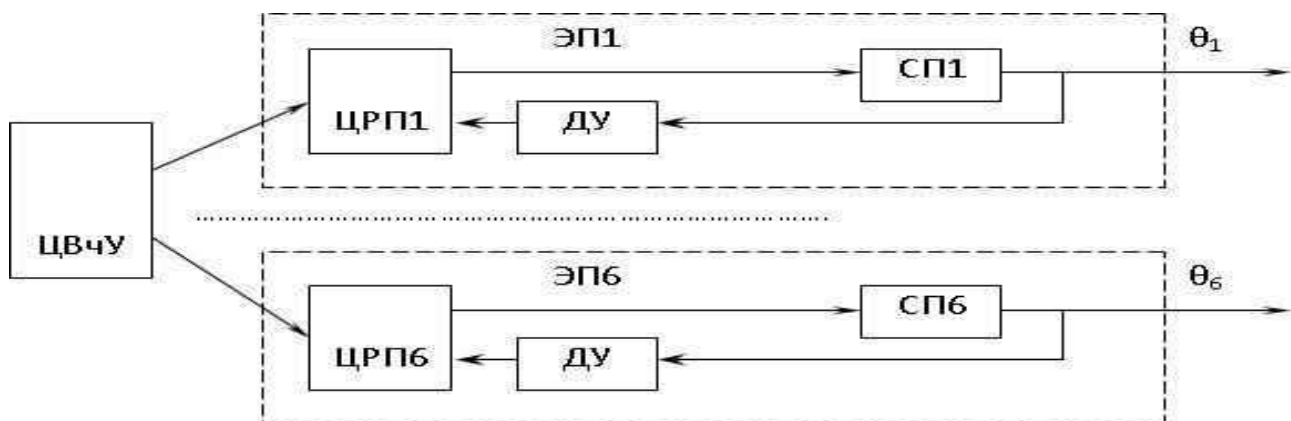
К электроприводам, используемым в промышленных роботах, относятся, как показано на рисунке 2.14, следующие типы:

- на коллекторных и вентильных (бесколлекторных) двигателях постоянного тока;
- на асинхронных нерегулируемых (с цикловым управлением) двигателях и на асинхронных с частотным регулированием;
- на шаговых двигателях;
- на различных регулируемых муфтах, сочетаемых с нерегулируемыми асинхронными двигателями или двигателем постоянного тока;
- на электромагнитах (соленоидных и других типов).



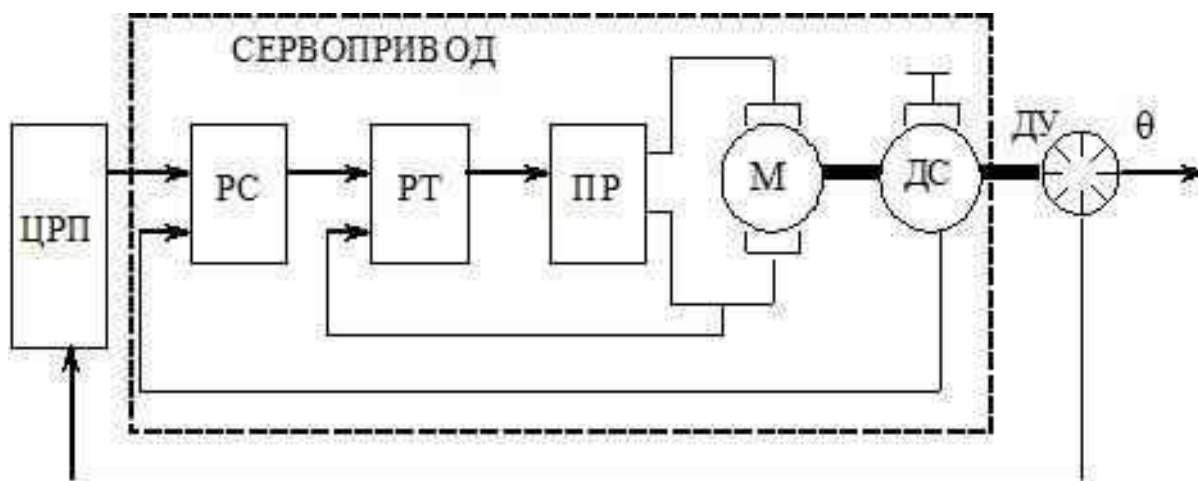
Рисунок 2.14 – Электродвигатели, используемые в приводах промышленных роботов

В большинстве случаев применяют традиционные электродвигатели с вращающимся валом. Тем не менее, применяют и специальные линейные приводы как постоянного, так и переменного тока.



ЭП1...ЭП6 - электроприводы; $\theta_1... \theta_6$ - степени подвижности; ЦВЧУ - общее центральное вычислительное устройство; ЦРП1...ЦРП6 - цифровые регуляторы положения; СП1...СП6 - сервопривода; ДУ - датчик угла.

Рисунок 2.15 – Функциональная схема управления электромеханического робота

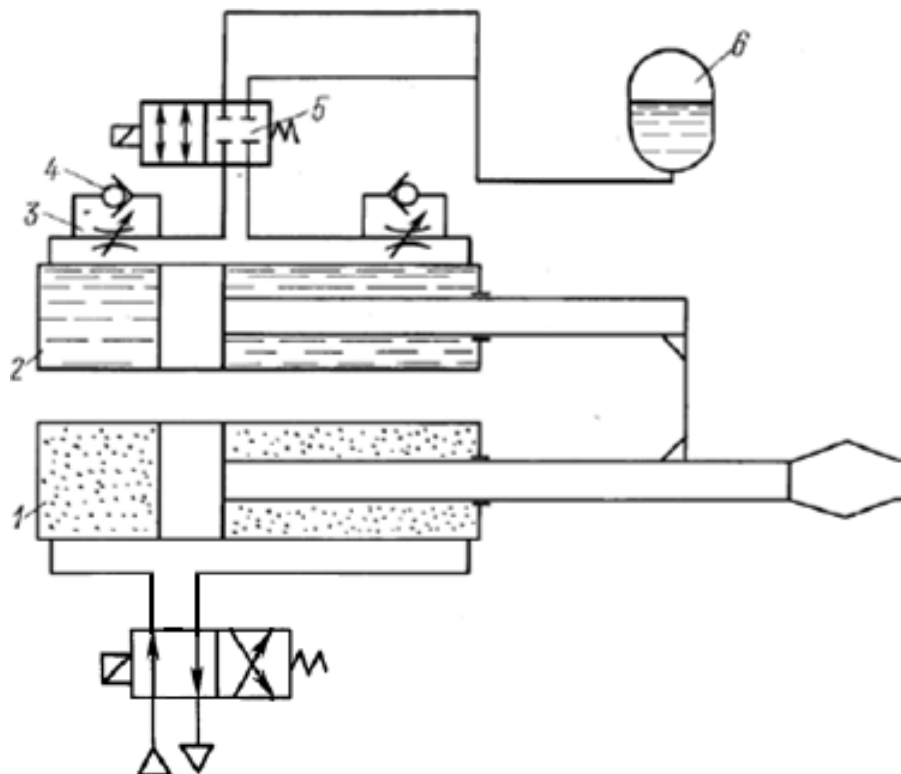


ЦРП - цифровой регулятор положения; РС - регулятор скорости; РТ - регулятор тока; ПР - преобразователь; М - двигатель; ДС - датчик скорости; ДУ - датчик угла; θ - степень подвижности.

Рисунок 2.16 – Функциональная схема сервопривода промышленного робота

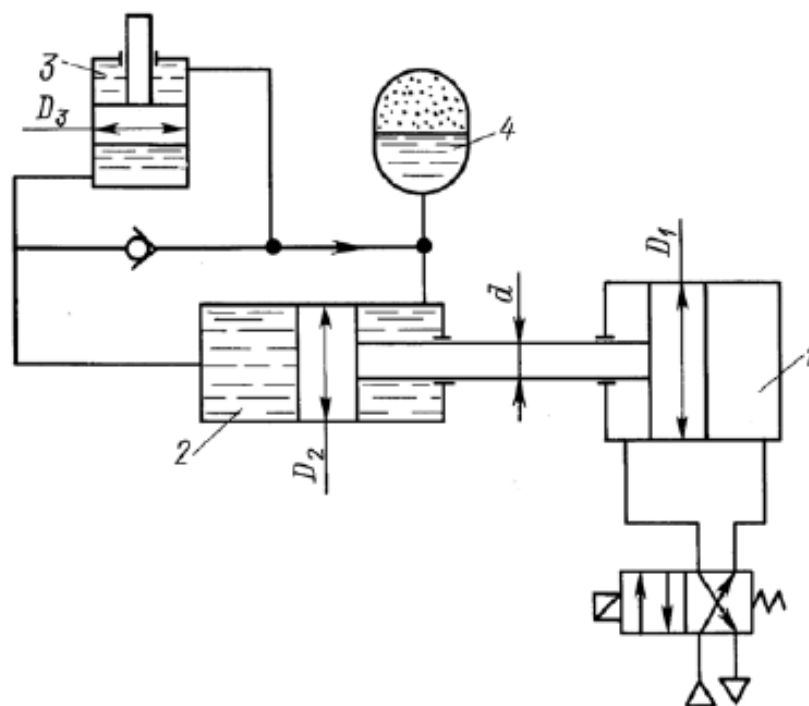
Структура электропривода роботов, в общем случае, образована электродвигателем с датчиками обратной связи по положению и скорости, передаточным устройством (механической передачей), тормозом, муфтами (например, для защиты двигателя от перегрузки) и устройством управления. Функциональная схема электропривода промышленных роботов представлена на рисунке 2.15. Схема сервопривода используемого в рассмотренной схеме приведена на рисунке 2.16.

Комбинированный привод, схемы которого приведены на рисунках 2.17 и 2.18, позволяет объединить достоинства отдельных типов приводов, а также компенсировать их недостатки. Для схемы приведенной на рисунке 2.17 гидродроссели 3 обеспечивают регулировку скорости перемещения поршня в гидроцилиндре 2, гидрораспределитель 5 выполняет роль гидрозамка, фиксируя положение поршня в пневмоцилиндре и, соответственно подвижного звена манипулятора.



1 - пневмоцилиндр; 2 - гидроцилиндр; 3 - гидродроссели; 4 - обратный клапан; 5 - гидрораспределитель; 6 - емкость с гидрожидкостью (аккумулятор).

Рисунок 2.17 – Схема работы пневмогидравлического привода



1 - пневмоцилиндр; 2 - гидроцилиндр; 3 - исполнительный гидроцилиндр; 4 - емкость.

Рисунок 2.18 – Схема работы гидропневматического привода

Схема, приведенная на рисунке 2.18, позволяет обойтись без гидронасосной станции. За счет подачи сжатого воздуха в пневмоцилиндр 1 создается избыточное давление в соответствующей полости гидроцилиндра 2, обеспечивая перемещение поршня со штоком исполнительного гидроцилиндра 3.

2.3 Исполнительный механизм

Решая задачи производства, рабочий орган манипулятора промышленного робота совершает требуемые движения, транспортируя объект или выполняя технологическую операцию. Перемещение рабочего органа осуществляется исполнительным механизмом, являющимся механической частью исполнительного устройства промышленного робота. Исполнительный механизм (ИМ) представляет собой систему твердых упругих тел, соединенных между собой. Эти твердые тела, являясь функциональными элементами кинематической цепи промышленного робота, называются звеньями. Конструктивно звенья могут быть образованы несколькими деталями, неподвижными относительно друг друга.

Неподвижное звено принято называть основанием или стойкой. Звено же, которому передается движение для преобразования исполнительным механизмом в необходимые движения других звеньев – входное. Звено, реализующее движение, для выполнения которого предназначен ИМ, называют выходным или конечным. Максимальное количество таких звеньев определяется числом степеней подвижности исполнительного механизма. Между входным и выходным звеньями находятся промежуточные звенья.

Движения звеньев манипулятора (М) по заданным траекториям невозможны без наложения на их определенные точки, линии или поверхности пространственно-кинематических связей, объединяющих эти звенья в кинематическую цепь.

Под пространственно-кинематической связью понимают такое состояние (или связь) двух любых его звеньев, которое (которая) накладывает на них определенные ограничения, не позволяющие занимать им друг относительно друга произвольные положения и иметь произвольные скорости.

Идеальная удерживающая связь между двумя сопряженными подвижными звеньями реализуется с помощью кинематической пары. Под предположением об идеальности связи в кинематической паре подразумевается правильность форм сопрягаемых конструктивных элементов, образующих пару, точность их размеров и отсутствие сил трения на соприкасающихся поверхностях этих элементов [17]. Другим, более простым, определением кинематической пары является ее определение как подвижного соединения двух соприкасающихся звеньев, которое обеспечивает определенное относительное движение. Такое определение вытекает из определения, приведенного в "Большой советской энциклопедии" [12]. В соответствии с энциклопедическим определением кинематическая пара – подвижное сопряжение двух твердых звеньев, налагающее условиями связи ограничения на их относительное движение. Каждое из условий связи устраняет одну из степеней свободы, то есть возможность реализации одного из независимых относительных движений в пространстве.

Кинематические пары делятся на пять классов. Класс пары определяется числом связей. Разность между возможным числом степеней свободы кинематической

пары W в прямоугольной системе координат и числом условий связи S ($W - S$) определяет ее подвижность. Число возможных степеней свободы в прямоугольной системе координат равно шести (3 поступательных движения в направлении 3-х осей координат и плюс 3 вращательных вокруг этих осей).

Итак, требуемое перемещение объекта в пространстве с заданной ориентацией реализуется кинематической структурой, образованной кинематическими цепями манипулятора.

В соответствии с реализацией выделенных ранее групп движений (глобальные, региональные и локальные) в манипуляторе выделяют и соответствующие системы. Это система передвижений, свойственная только мобильным роботам, и манипуляционная система. При этом в манипуляционной системе две различные по функциональному назначению кинематические цепи: рука и кисть.

Под "рукой" понимают ту часть манипулятора, которая обеспечивает транспортирующие перемещения (региональные движения), а под "кистью" – ориентирующие, т.е. звенья и пары, которой обеспечивают ориентацию схвата (его локальные движения).

Для транспортирования выходного звена в любую точку рабочего пространства по заданной траектории и с заданной ориентацией необходимо, чтобы механизм манипулятора имел не менее шести управляемых степеней подвижности. Однако, в этом случае данная автоматическая система будет весьма сложна и дорогостоящая, как с конструктивной, так и с эксплуатационной точек зрения. Поэтому, в тех случаях, когда производственные задачи могут решаться с использованием более простых машин, применяют механизмы с меньшим числом степеней подвижности – тремя, а иногда и двумя.

Решая задачу структурного синтеза кинематики манипулятора, следует исходить из следующих соображений:

- кинематические пары манипуляторов снабжаются приводами, в состав которых входят как двигатели, так и тормозные устройства, поэтому в схемах этих механизмов, как правило, используют неподвижные кинематические пары пятого класса: вращательные или поступательные;

- требуется обеспечить не только заданную подвижность выходного звена, но и ориентацию осей кинематических пар, при которой формируется необходимая форма зоны обслуживания, при простоте и удобстве программирования его движений;

- выбирая ориентацию кинематических пар, надлежит учитывать схему расположения приводов (в едином блоке, на подвижных звеньях, комбинированно) и способ уравнивания весов звеньев.

С учетом первого условия кинематические пары с несколькими степенями подвижности заменяют на эквивалентные кинематические соединения, как показано на рисунке 2.19.

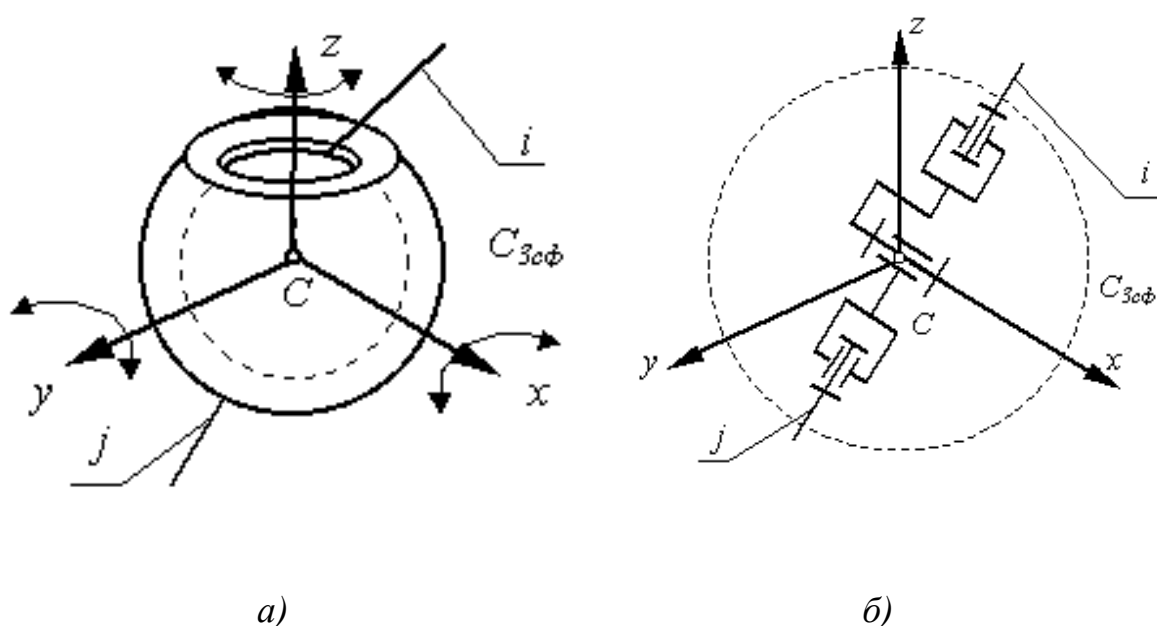
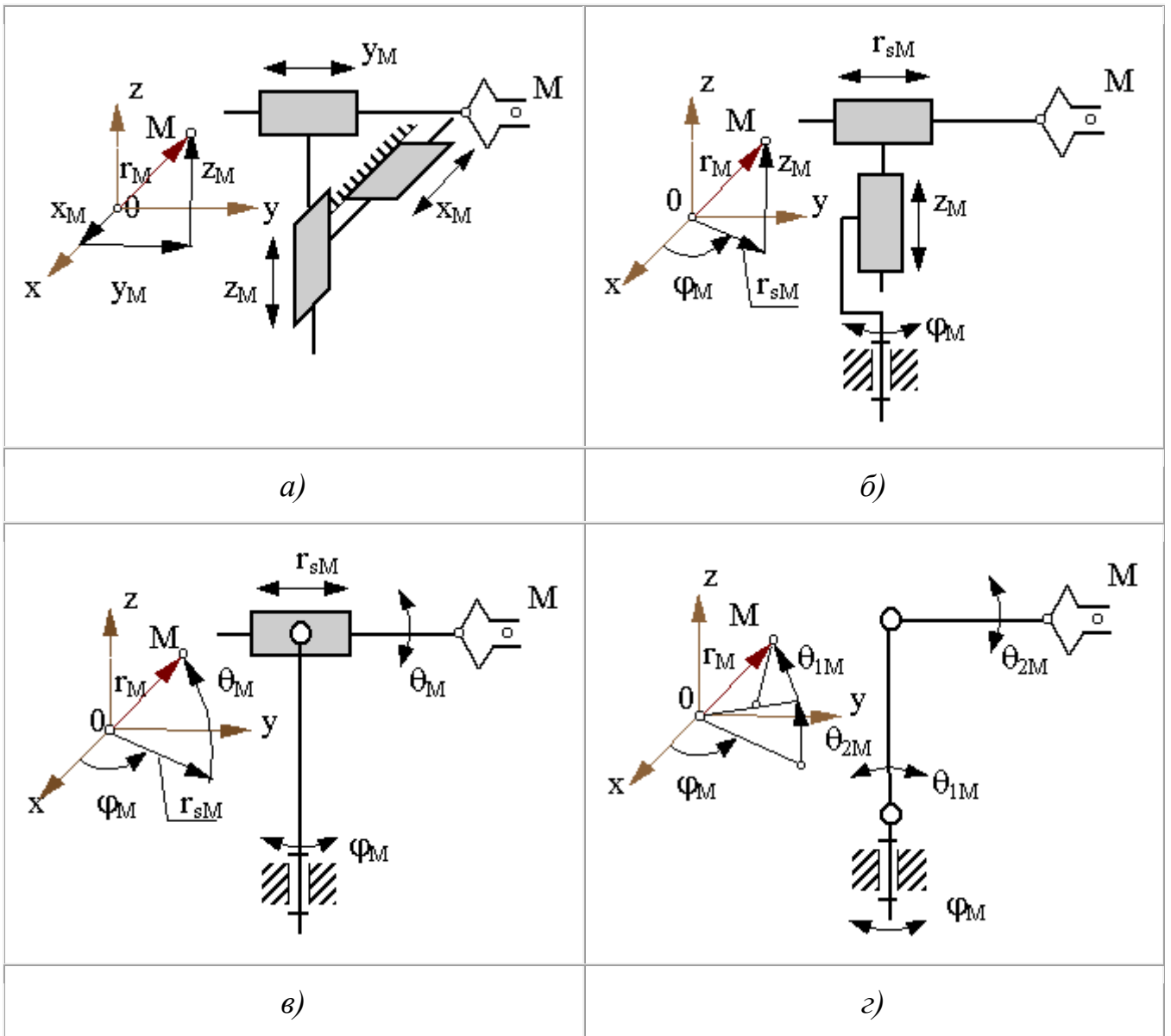


Рисунок 2.19 – Сферическая кинематическая пара (а) и соответствующее ей эквивалентное кинематическое соединение (б)

Эквивалентное перемещение выходного звена в пространстве обеспечивается при ориентации осей трех кинематических пар по осям системы координат. При этом выбор системы координат определяет тип руки манипулятора и вид его зоны обслуживания. По ГОСТ 25685-83 определены виды систем координат для руки манипулятора, которые приведены на рисунке 2.19. Здесь даны примеры структурных схем механизмов с соответствующими им системами координат.



a – прямоугольная (декартова); *б* – цилиндрическая; *в* – сферическая; *г* – угловая (ангулярная).

Рисунок 2.19 – Кинематические структуры рук манипуляторов с соответствующими им системами координат

Структурные схемы механизмов кисти, применяемые в манипуляторах, даны на рисунке 2.20. Присоединяя к выходному звену руки тот или иной механизм кисти, можно получить большинство известных структурных схем манипуляторов, которые применяются в реальных промышленных роботах.

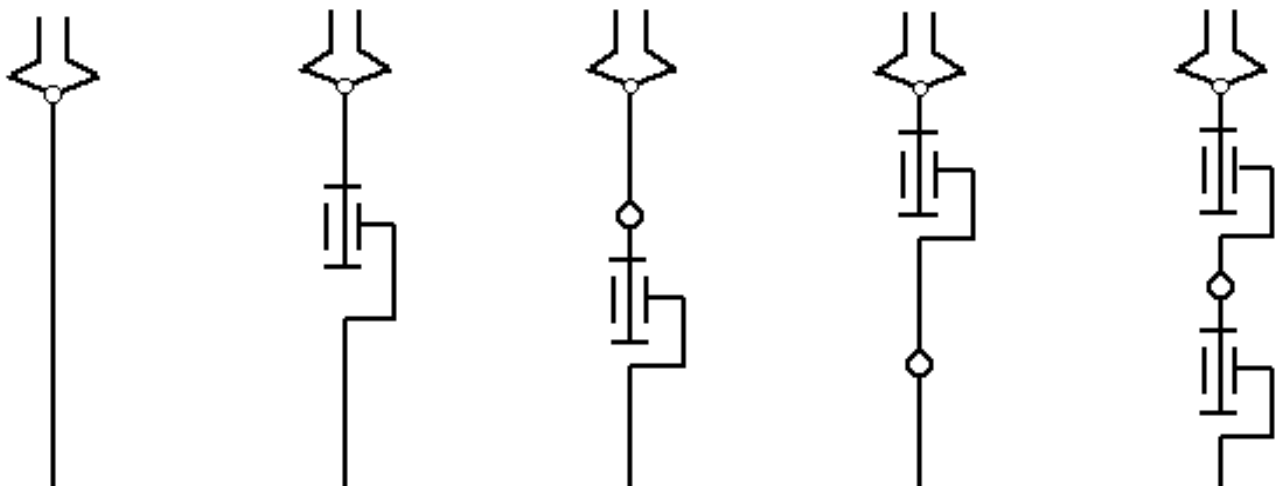


Рисунок 2.20 – Кинематические структуры кисти манипуляторов

На кинематическую структуру манипуляторов влияет и место размещения приводов. При непосредственном размещении приводов в кинематических парах, или на подвижных звеньях к их массам добавляются и массы приводов. Это приводит к увеличению суммарной нагрузки на приводы и их мощности, а массогабаритные показатели (отношение массы к полезной мощности) ухудшаются. При расположении наиболее мощных приводов звеньев руки, на основании робота создают дополнительные кинематические цепи, передающие движение от привода к подвижному звену. Пример такой структуры приведен на рисунке 2.21.

В этой схеме трехподвижный рычажный механизм с ангулярной системой координатных перемещений, образованный четырьмя звеньями $0, 1, 2$ и 3 дополнен двумя кинематическими цепями приводов второго и третьего звеньев, образованными соответственно кулисным механизмом, состоящим из звеньев $4, 5$ и 2 , и кулисным механизмом – из звеньев $6, 7$ и 8 с шарнирным параллелограммом – $8, 9, 2$ и 3 .

Получается, что манипуляторы с размещением приводов в едином блоке или с комбинированной схемой (часть приводов в едином блоке, а часть на подвижных звеньях) отличаются более сложной кинематикой. Но увеличение количества звеньев и кинематических пар компенсируется уменьшением масс и моментов инерции, подвижных звеньев манипулятора, положительно сказывающихся на показателях точности и динамики манипуляторов. Замкнутые кинематические цепи, также повышают жесткость и точность механизма. Комбинированная схема размещения

приводов отличает манипуляторы в лучшую сторону по энергетическим, динамическим характеристикам и показателям точности.

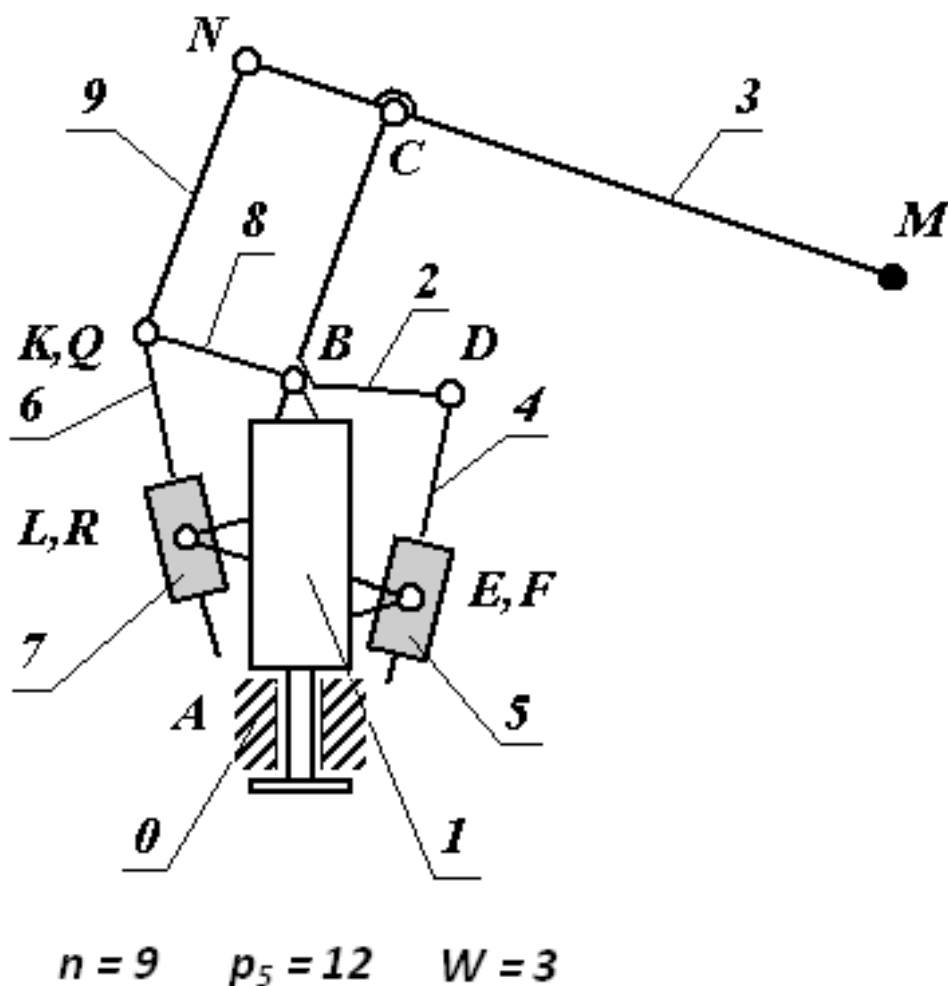
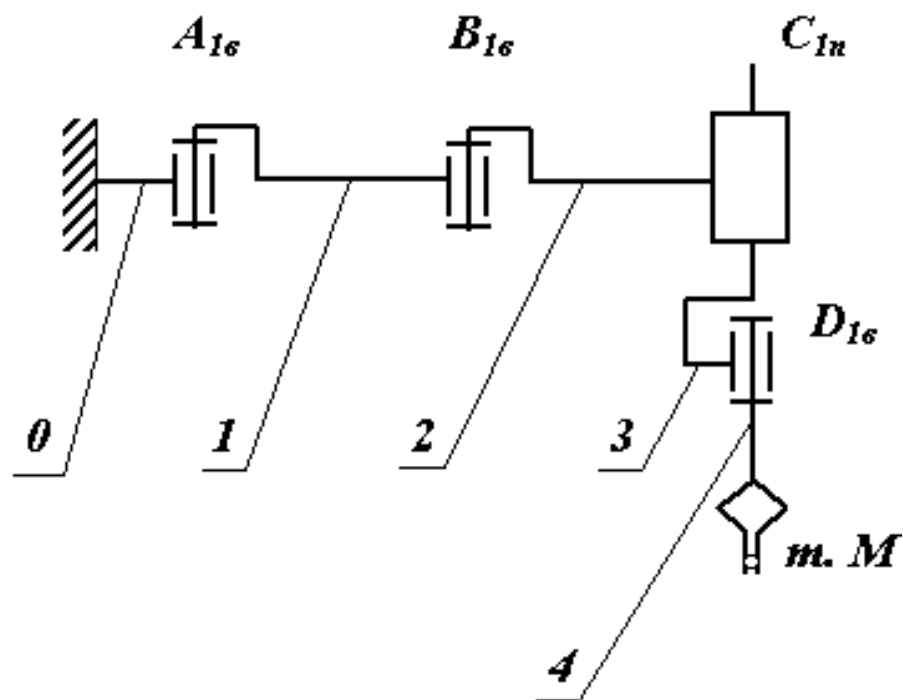


Рисунок 2.21 – Пример кинематики манипулятора с расположением приводов в едином блоке

На кинематическую схему манипуляторов оказывает влияние и решение вопроса компенсации статических нагрузок, обусловленных весом звеньев, поскольку восприятие этой нагрузки непосредственно двигателями влечет за собой значительное увеличение их мощностей и моментов тормозных устройств. Компенсируют эту нагрузку различными способами. Например, применяют кинематические схемы, как показано на рисунке 2.22, в которых силы тяжести компенсируются реакциями опор в кинематических парах.



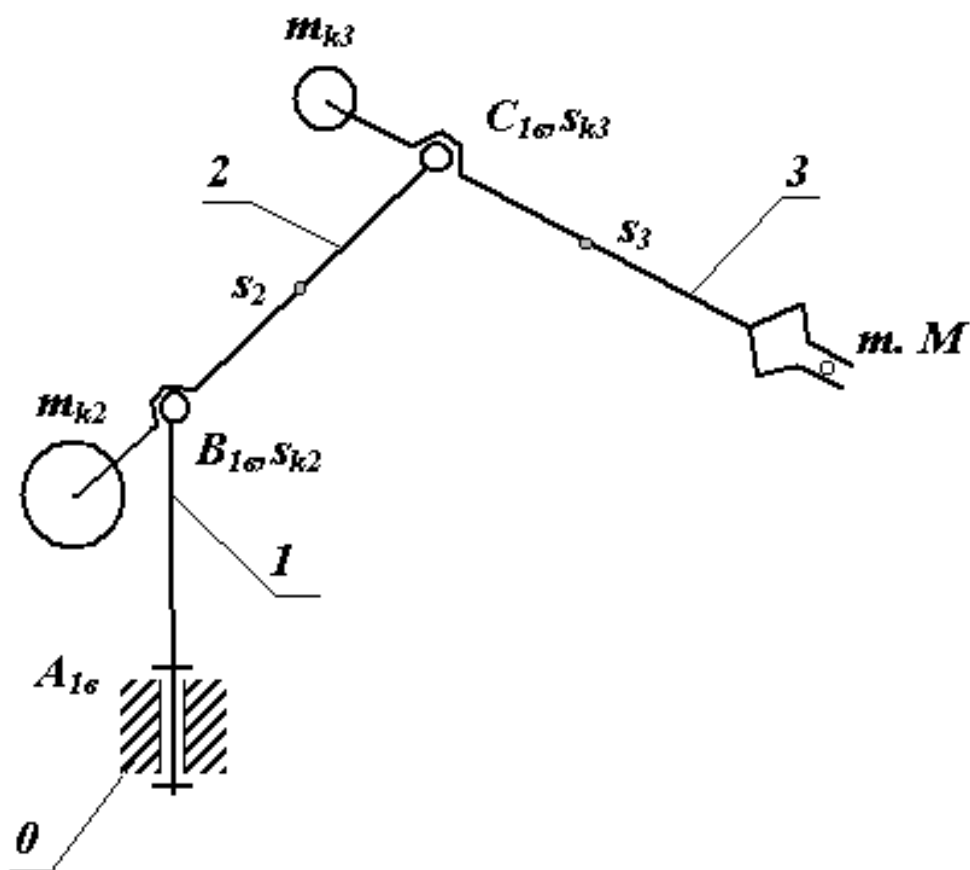
0, 1, 2, 3 – звенья, 4 – захватное устройство.

Рисунок 2.22 – Схема компенсации статической нагрузки от веса подвижных звеньев реакциями опор

В этой схеме вес каждого из подвижных звеньев влияет на параметры двигателя его привода только опосредованно через силу трения качения в опоре. Статическая нагрузка, обусловленная массой звена, компенсируется реакциями опор, что способствует некоторому увеличению их размеров, являясь, конечно же, недостатком.

Уравновешивание звеньев манипулятора корректировкой положения их центров масс, с использованием для этого корректирующих (дополнительных) масс, как показано на рисунке 2.23, приводит к увеличению массы манипулятора и моментов инерции его звеньев. Это является недостатком, но при этом кинематическая схема остается неизменной.

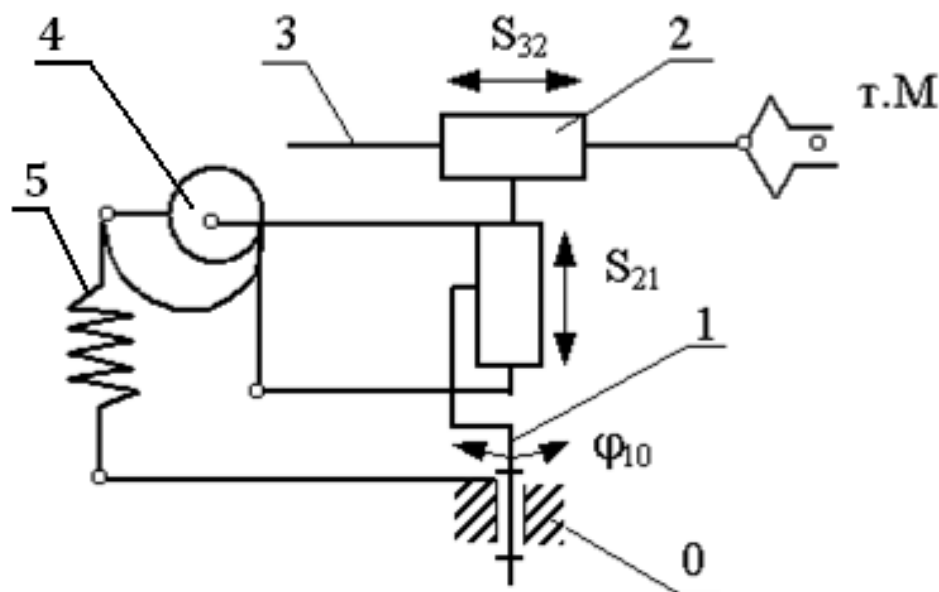
Для уравновешивания звеньев используют и другие схемы, например, с использованием пружинных компенсаторов или балансиров. Для полной разгрузки приводов на всем относительном перемещении звеньев эти устройства дополняются механизмами, согласующими упругую характеристику пружины с характеристикой уравновешиваемых сил, например кулачковыми или рычажными. В этих случаях кинематика манипуляторов, как видно из рисунка 2.24, также усложняется.



m_{ki} – корректирующая масса i -того звена; S_i – центр масс i -того звена; S_{ki} – скорректированный (совмещенный с центром кинематической пары) центр масс i -того звена.

Рисунок 2.23 – Компенсация веса звеньев корректирующими массами

Еще одной важной особенностью манипуляторов, упомянутых выше, является изменение структуры механизма в процессе функционирования. При включении тормозов, например, два звена механизма жестко соединяются друг с другом, образуя одно, т.е. исчезает одна подвижная кинематическая пара и одно звено, сокращая число степеней подвижностей манипулятора. Изменения происходят и при соприкосновении схвата с объектом манипулирования или рабочего органа с объектами взаимодействия, в результате чего образуются кинематические пары. Кинематическая цепь манипулятора замыкается и уменьшается число степеней подвижности. То есть в цепи могут возникать избыточные связи. Эти структурные особенности манипуляторов необходимо учитывать при программировании работы промышленного робота.



0, 1, 2, 3 – звенья манипулятора, 4 – кулачковый механизм (имеет профиль спирали Архимеда), 5 – пружина.

Рисунок 2.24 – Пример силовой разгрузки привода вертикальных перемещений от действия сил тяжести звеньев

На этапе проектирования ПР выполняют анализ его структурно-кинематической схемы. Сутью кинематического анализа на базе методов, применяемых для дифференциальных механизмов, является определение передаточных отношений и кинематических зависимостей между звеньями, а так же характера взаимных связей между отдельными приводами при их совместной работе и скорости выходного звена. Цель кинематического анализа состоит:

- в синтезе геометрических характеристик проектируемых модулей (степеней подвижности) и манипулятора в целом с рабочим пространством и рабочей зоной работа;
- в определении возможности манипулятора с точки зрения кинематики выполнения технологических операций;
- в учете различных неблагоприятных факторов (упругая податливость и др.)

Результаты исследований необходимы для устранения взаимного влияния друг на друга кинематических цепей ПР и обеспечения корректировки конструктор-

ских решений. Кроме того они необходимы при проектировании системы программного управления.

Сформулируем требования предъявляемые к кинематическим цепям ПР. К ним относятся:

- обеспечение соблюдения необходимых требований технологии при подходе рабочего органа манипулятора ПР к заданной точке его позиционирования и совершение требуемых ориентирующих перемещений;
- исключение взаимного влияния друг на друга кинематических цепей;
- исключение возникновения произвольных перемещений подвижных звеньев манипулятора ПР под действием внешних сил;
- уравнивание звеньев для снижения энергозатрат.

Для постановки и решения задач составляется кинематическая модель манипулятора, в основу которой положены геометрические размеры звеньев, а также типы, количество и распределение кинематических пар.

Манипулятор представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, элементы которой соединены друг с другом посредством кинематических пар. Как правило, это одноподвижные кинематические пары пятого класса – вращательные или поступательные.

Если кинематическая цепь не содержит внутренних замкнутых контуров, то число кинематических пар n определяет число степеней подвижности манипулятора.

Положение кинематической цепи в пространстве определяется с помощью обобщенных координат g ($i=1,2,3...n$) характеризующих относительные перемещения в кинематических парах.

Для определения относительных положений рабочего органа в пространстве введем координаты z_j ($j=1,2,...m$), где $m \leq 6$. В общем случае $m = 6$, т.е. необходимо ввести шесть скалярных величин, например три координаты некоторой точки схвата, принятой за полюс, и три угла характеризующих ориентацию системы координат, жестко связанной со схватом, относительно базовой системы координат.

Определение положения выходного звена манипулятора осуществляется решением прямой задачи о положении, при котором находят положение рабочего ор-

гана манипулятора по заданным обобщенным координатам (относительным перемещениям) g_i ($i=1,2,\dots,n$) в кинематических парах. Решение прямой задачи позволяет определить геометрические характеристики рабочего пространства и рабочей зоны манипулятора, характеристики точности (погрешности Δz_i), координаты схвата z_j .

Решая обратную задачу о положении манипулятора, определяют обобщенные координаты (g_i) манипулятора по заданному закону движения выходного звена (по его положению). При этом определяются и другие кинематические характеристики.

Важным условием функционирования промышленного робота является исключение взаимного влияния кинематических цепей его манипулятора при его компоновке с размещением двигателей в едином блоке. В этом случае необходимо обеспечить взаимное соответствие поворота i -го звена n -ого шарнира на угол φ_i с поворотом вала соответствующего двигателя на угол φ_i .

Для описания связи кинематических цепей используется матрица частных передаточных отношений

$$T = \begin{vmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial \psi_1}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_1}{\partial \varphi_n} \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial \psi_2}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_2}{\partial \varphi_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial \psi_n}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial \psi_n}{\partial \varphi_n} \end{vmatrix}, \quad (2.2)$$

где в i – том столбце расположены передаточные отношения в механизме, имеющем одну степень подвижности, а все углы поворота звеньев φ кроме φ_i ($I = 1, 2, \dots$) фиксированы.

Для развязки кинематических цепей манипулятора необходимое и достаточное условие это – условие диагональности матрицы. Достичь этого можно включив в кинематическую цепь специальные компенсирующие дифференциальные механизмы.

Контрольные вопросы

- 1 Из каких двух крупных основных частей состоит ПР?
- 2 В чём заключается функциональное назначение манипулятора ПР?
- 3 Опишите структуру трёхподвижного рычажного механизма манипулятора.
- 4 Как определяется число степеней подвижности (свободы) ПР?
- 5 Как графически обозначается цилиндрическое соединение звеньев и шаровой шарнир?
- 6 Перечислите структурные кинематические схемы ПР.
- 7 Назовите виды движений, которые могут быть реализованы захватными устройствами ПР.
- 8 Что используют для обозначения кинематических пар в структурно-кинематических схемах ПР?
- 9 Перечислите типы приводов, которые нашли применение в ПР.
- 10 Из каких элементов состоит привод ПР?
- 11 От чего зависит выбор типа привода ПР?
- 12 Перечислите требования к приводам ПР?
- 13 Область применения и недостатки пневматического привода.
- 14 Назовите достоинства гидравлических приводов.
- 15 Перечислите электродвигатели используемые в приводах ПР.
- 16 Что входит в структуру электропривода роботов?
- 17 Для чего предназначен исполнительный механизм?
- 18 Что понимается под пространственно-кинематической связью?
- 19 В чём различие между "рукой" и "кистью" манипулятора?
- 20 Как влияет место размещения привода на кинематическую структуру ПР?
- 21 В чём заключается суть кинематического анализа на этапе проектирования?
- 22 Назовите требования предъявляемые к кинематическим цепям ПР.
- 23 Что является важным условием функционирования ПР?

3 Компоновки промышленных роботов

Компоновки промышленных роботов определяют используемые системы координатных перемещений и системы координат, в которых они будут функционировать, реализуя имеющиеся степени подвижности. Так компоновка, соответствующая рисунку 3.1, а, реализует линейную систему координатных перемещений, обеспечивая функционирование механической системы ПР (выполнение транспортирующих движений) в пространственной прямоугольной (декартовой) системе координат.

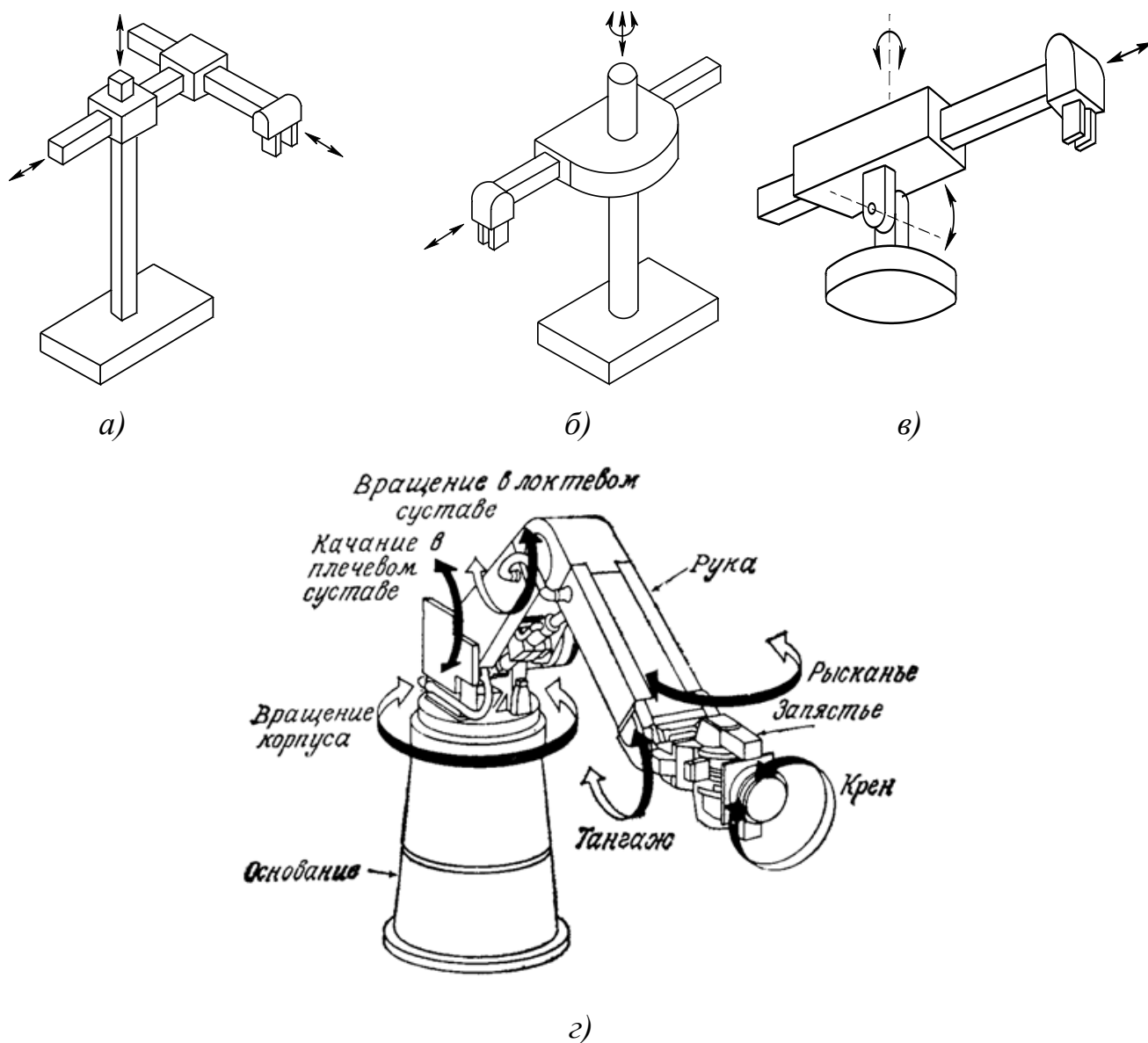


Рисунок 3.1 – Варианты компоновок манипуляторов промышленных роботов

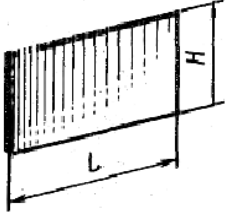
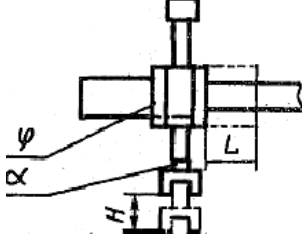
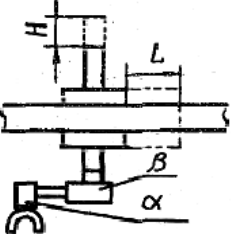
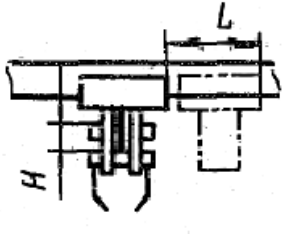
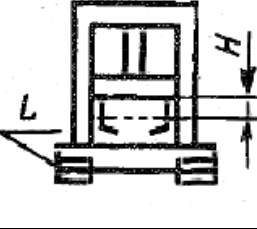
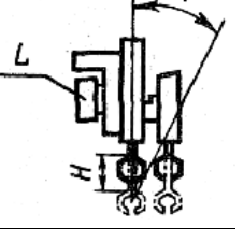
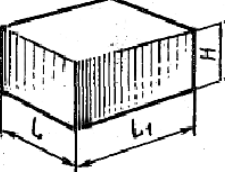
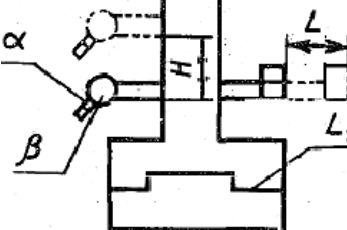
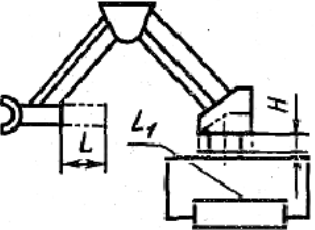
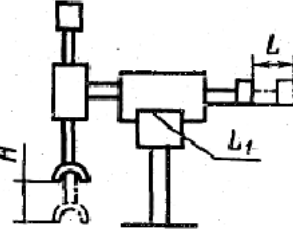
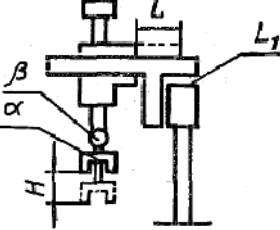
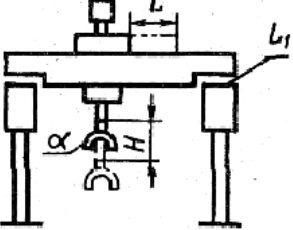
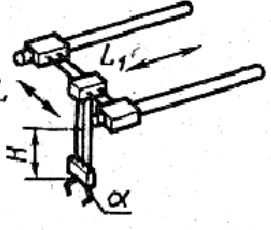
Компоновки, приведенные на рисунках 3.1, б и 3.1, в, реализуют полярную систему координатных перемещений, обеспечивая, соответственно, две транспортирующих степени подвижности в цилиндрической пространственной системе координат и три – в сферической. При этом вокруг вертикальной, как показано на рисунке 3.1, б, и горизонтальной, в соответствии с рисунком 3.1, в, оси поворачивается вся рука, а линейное перемещение совершают только ее составные части. Компоновка манипулятора ПР, изображенная на рисунке 3.1, г, соответствуя ангулярной (угловой) системе координатных перемещений, способна с помощью трех степеней подвижности руки (вращение корпуса, качание в плечевом суставе и вращение в локтевом) выполнять транспортирование объекта в сферической системе координат. Используя дополнительно еще три степени подвижности (рысканье запястья, его тангаж и крен), совершаемые кистью, манипулятор осуществляет требуемую ориентацию схвата. То есть, под компоновкой промышленного робота следует понимать последовательность чередования кинематических пар от базового до выходного звена.

Выбор оптимальной компоновки, как и конструктивного исполнения манипуляторов ПР зависит от их назначения, а также и от особенностей функционирования совместно с конкретным технологическим оборудованием.

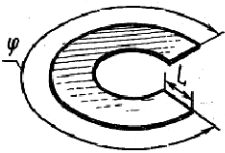
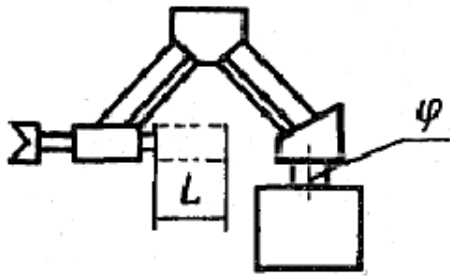
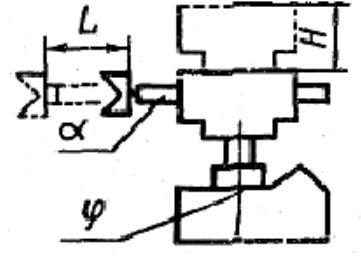
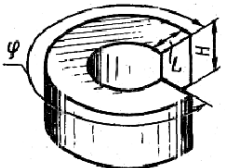
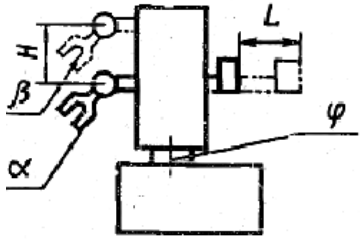
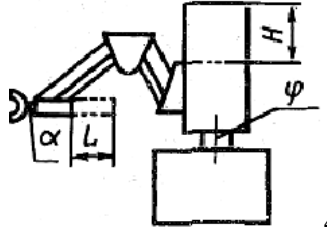
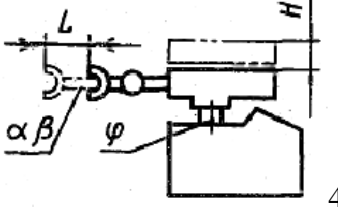
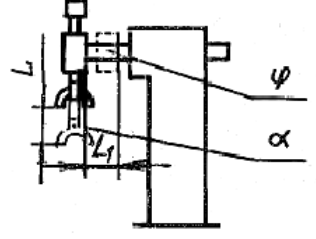
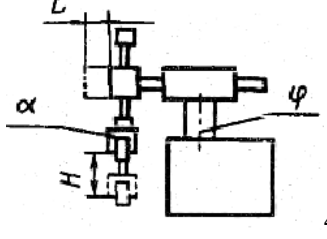
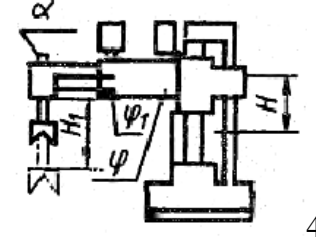
В свое время ЭНИМС (Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков) предложил и стандартизовал классификацию и типы компоновочных схем различных роботов в машиностроении, сведенные в таблицу 3.1 по видам координат с определенным кодированием типа компоновки [13]. В таблице используются следующие условные обозначения:

- L - горизонтальное перемещение руки;
- H - вертикальное перемещение руки;
- L_1 - горизонтальное перемещение корпуса (каретки) манипулятора;
- H_1 - линейное перемещение кисти руки;
- φ - угол поворота манипулятора;
- φ_1, φ_2 - углы поворота звеньев руки;
- α - угол поворота кисти руки;
- β, β_1 - углы качания кисти руки.

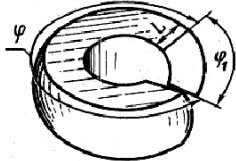
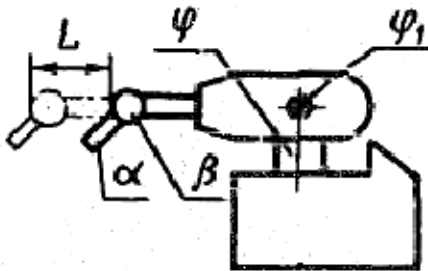
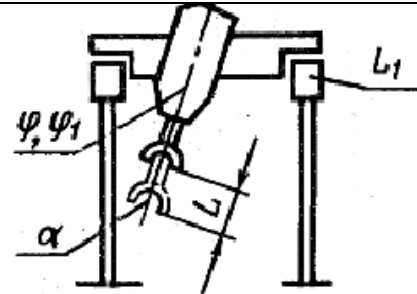
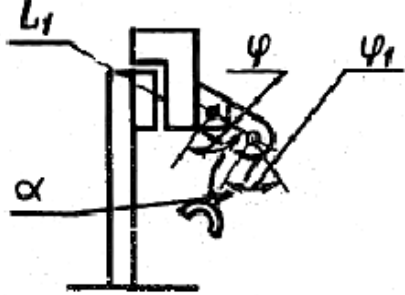
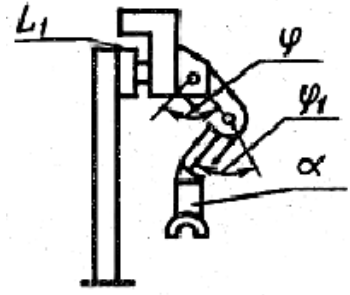
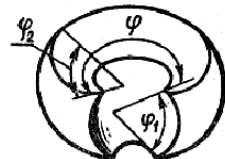
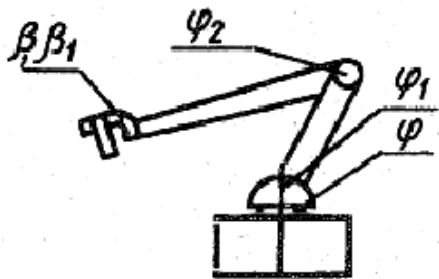
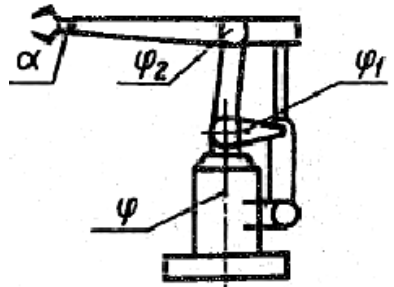
Таблица 3.1 – Компоновочные схемы промышленных роботов в машиностроении

Система координат движений звеньев руки манипулятора		Рабочая зона	Обозначение группы (конструктивное исполнение)	Компоновочная схема и её индекс		
Декартова	Плоская		1 (01...19)	 01	 02	 03
				 04	 05	
	Пространственная		2 (20...29)	 20	 21	 22
				 23	 24	 25

Продолжение таблицы 3.1

Система координат движений звеньев руки манипулятора		Рабочая зона	Обозначение группы (конструктивное исполнение)	Компоновочная схема и её индекс					
Полярная	Плоская		3 (30...39)			30		31	
	Цилиндрическая		4 и 5 (40...59)		40		41		42
					43		44		45

Продолжение таблицы 3.1

Система координат движений звеньев руки манипулятора		Рабочая зона	Обозначение группы (конструктивное исполнение)	Компоновочная схема и её индекс			
Полярная	Сферическая		6 и 7 (60...79)		60		61
		Сложная полярная	Цилиндрическая	8 (80...89)		80	
Сферическая			9 (90...99)		90		91

В рассматриваемой таблице представлены компоновки, соответствующие следующим системам координатных перемещений и системам координат:

- прямолинейная - плоская 01-07 и пространственная 20-24;
- полярная - плоская 30-31 и пространственная – цилиндрическая 40-49 и сферическая 60-64;
- сложная полярная - цилиндрическая 80-81 и сферическая 90-94.

Эта классификация проведена по следующим признакам:

- системе координат;
- форме линейных и угловых перемещений;
- мобильности – стационарные и передвижные схемы;
- типу и конструкции опорных систем;
- числу рук;
- величине перемещений – линейных H и L , углу поворота робота - φ , звеньев руки φ_1 и φ_2 , поворота кисти руки – α и качания кисти – β_1 и β_2 .

Компоновочные схемы разделяются по системам координат на группы, которые по указанным выше признакам подразделяются на подгруппы, имеющие свой код.

Выбор компоновочной схемы для конкретного робота проводится в зависимости от следующих факторов:

- компоновки роботизированной ячейки;
- особенностей обслуживаемого оборудования;
- особенностей транспортирования объекта манипулирования;
- числа и характера обслуживаемых позиций в РТЯ (робототехнической ячейки);
- величины, вида и формы движения элементов робота в РТЯ.

Компоновка и конструктивное исполнение робота, прежде всего, зависят от того, какие движения и в какой последовательности должен выполнять манипулятор при функционировании. Для переноса объекта манипулирования без его ориентации (в любое место рабочей зоны) необходимо и достаточно наделить манипулятор тремя степенями подвижности, каждая из которых может быть как поступательной, так

и вращательной. Эти степени подвижности, называемые переносными, или региональными, определяют систему координат, в которых осуществляются основные движения исполнительного устройства робота по переносу объекта. В зависимости от характера каждой из переносимых степеней подвижности (поступательной или вращательной), их последовательности и взаимной ориентации в пространстве формируется та или иная базовая система координат манипулятора со своими особенностями и формой пространственной фигуры, описываемой рабочим органом ПР. Таким образом, вид базовой системы координат манипулятора ПР определяет его конструктивное исполнение, уровень сложности системы управления и трудности программирования исполнительных движений.

Промышленный робот, с линейной системой координатных перемещений, имеет, как показано на рисунке 3.2, прямоугольную, или декартову, систему координат. Рассматриваемый манипулятор ПР имеет три линейные степени подвижности, реализованные одноподвижными поступательными кинематическими парами. Такая система перемещений обеспечивает прямолинейное движение рабочего органа М в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Основание робота представляет собой корпус, выполненный в виде балочной, мостовой или порталной конструкции. По его направляющим поступательно перемещается в одном из горизонтальных направлений узел, реализующий вертикальное перемещение рабочего органа. Вертикальное перемещение относительно стойки (или колонны), совершающей горизонтальное движение относительно корпуса, выполняет подвижно закрепленная на ней тележка (или каретка). Второе горизонтальное перемещение рабочего органа в направлении перпендикулярном движению стойки обеспечивает "рука" манипулятора, совершающая движение относительно закрепленной на стойке тележки. Форма рабочего пространства, ограниченного крайними положениями рабочего органа, называемого рабочей зоной, представляет собой прямоугольный параллелепипед.

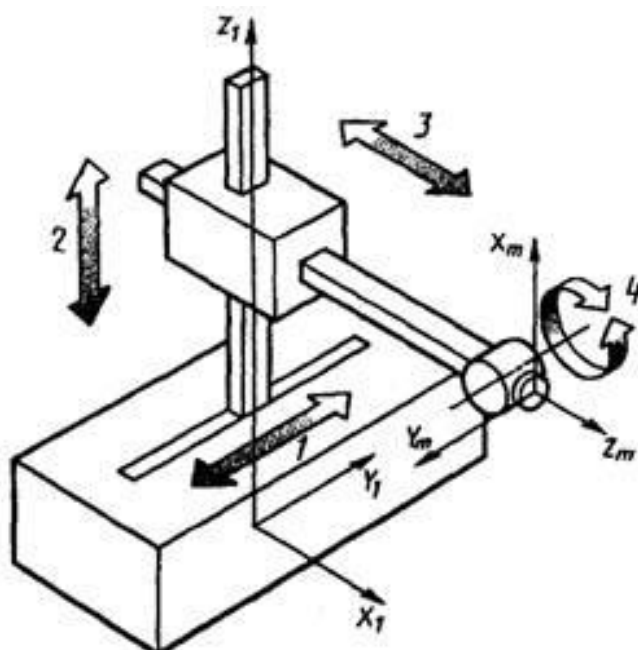


Рисунок 3.2 – Робот, работающий в прямоугольной системе координат

Простота и свойства системы линейных координатных перемещений манипуляторов с прямоугольной системой координат (удобство обслуживания рабочей зоны, относительно высокая жесткость) обеспечили использование таких ПР в стесненных условиях, в подвесном исполнении и при необходимости обеспечения высокой точности. Примерами могут служить обслуживание основного технологического оборудования (металлорежущие станки) и сборочных операций. Несмотря на все их преимущества (сравнительная простота манипулятора и его программирования), эти промышленные роботы используются сравнительно редко. Их недостатки это – увеличение габаритов при относительно малом объеме рабочей зоны, увеличение длительности циклограммы процесса. Как правило, для выполнения подобных работ используют каретки, подвешиваемые на направляющих, либо используют порталные конструкции.

Промышленный робот с цилиндрической системой координат имеет одну вращательную и две поступательные подвижные кинематические пары для реализации необходимых степеней подвижности, как показано на рисунке 3.3. Они образуют полярную систему координатных перемещений. В отличие от предыдущей схемы манипулятора с линейно системой координатных перемещений, у рассматриваемого колонна не перемещается относительно корпуса горизонтально, а совершает

поворот вокруг своей оси. Остальные степени подвижности реализуются как и в предыдущем случае, в соответствии с рисунками 3.2 и 3.3. Форма рабочей зоны такого манипулятора ПР представляет собой полый цилиндр.

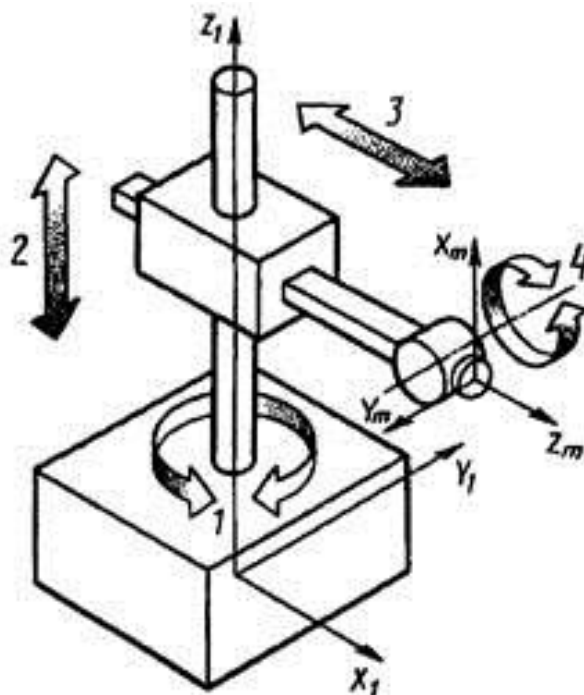


Рисунок 3.3 – Робот, работающий в цилиндрической системе координат

Удобство конструкции и программирования, способствовали более широкому распространению таких манипуляторов с полярной системой координатных перемещений. Эта система позволяет обслуживать рабочее пространство с большим объемом, и облегчает планировку и компоновку рабочих мест и оборудования при создании робототехнических комплексов. Однако у этой системы координатных перемещений есть и недостаток. Им является затруднение обслуживания технологического оборудования, расположенного на небольшой высоте.

Промышленный робот со сферической системой координат, имеющий опять же полярную систему координатных перемещений, схема которого представлена на рисунке 3.4, имеет две вращательные подвижные кинематические пары и одну поступательную. В отличие от предыдущей схемы, в рассматриваемой еще одна поступательная кинематическая пара заменена на вращательную, однако "рука" манипулятора всё ещё способна совершать поступательные перемещения. Форма рабо-

чей зоны такого манипулятора представляет собой полый шар, ограниченный сферической и двумя плоскими поверхностями.

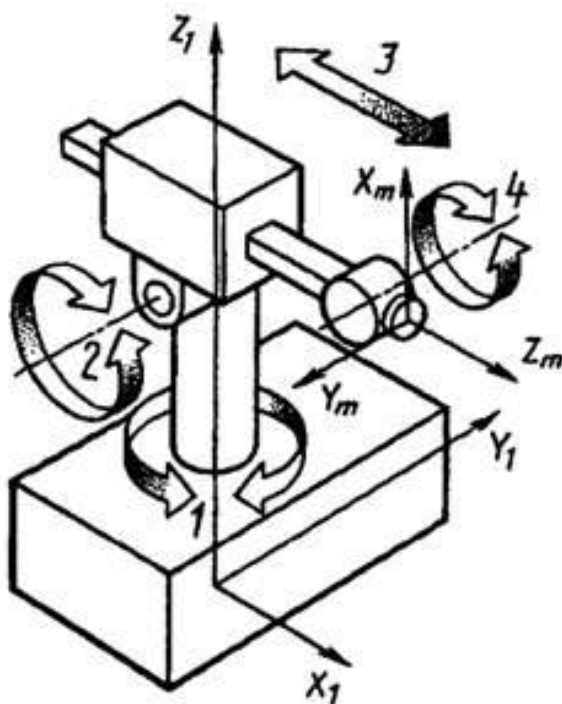


Рисунок 3.4 – Робот, работающий в полярной системе координат

Такие манипуляторы более громоздки, по сравнению с предыдущими, и нуждаются в более сложной системе программного управления. Тем не менее, их высокая универсальность, наряду с возможностью обслуживания рабочих зон **б**ольшего объема (в сравнении с манипуляторами прямоугольной и цилиндрической систем координат), определили их ещё более широкое распространение.

Манипулятор ПР с ангулярной (угловой) системой координатных перемещений и сферической системой координат, схема которого представлена на рисунке 3.5, имеет три вращательные подвижные кинематические пары, обеспечивающие степени подвижности. Такую конфигурацию ещё называют антропоморфной. Положение и ориентация манипулятора в рабочей зоне такого робота определяются за счет изменения только угловых положений его звеньев друг относительно друга. Иными словами манипулятор состоит из звеньев аналогично руке человека. Форма же рабочей зоны представляет собой сложное сферическое пространство, ограниченное сферическими и цилиндрическими поверхностями.

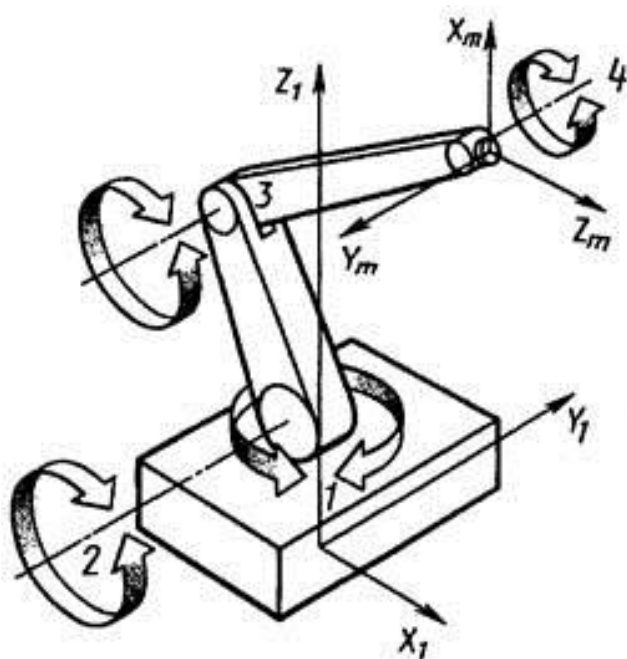


Рисунок 3.5 – Манипулятор робота, с ангулярной (антропоморфной) системой координатных перемещений

Ангулярная система координатных перемещений является достаточно сложной как с конструкторской точки зрения, поскольку необходимы специальные меры для повышения точности и жесткости манипулятора, так и с точки зрения программирования. В результате, помимо сказанного, требуется использование более сложных устройств программного управления. В то же время, эти манипуляторы отличаются высокой универсальностью и наибольшим объемом, обслуживаемой рабочей зоны. Благодаря этому они хорошо компонуются с оборудованием, позволяя минимизировать производственные площади.

Схема манипулятора ПР, с полярной системой координатных перемещений и цилиндрической системой координат, представлена на рисунке 3.6. степени подвижности данного манипулятора реализованы тремя вращательными одноподвижными кинематическими парами и одной поступательной одноподвижной кинематической парой. Манипулятор такого робота состоит из вращающейся колонны, или корпуса, присоединенного к нему и поворачивающегося в той же горизонтальной плоскости звена, на конце которого в направляющей перемещается вертикально "рука".

4 Конструкции промышленных роботов

4.1 Общие сведения о конструкциях

Под конструкцией роботов понимают конструктивное исполнение их механической системы. Механическая система ПР образована двумя подсистемами – несущей механической системой (НМС) и исполнительной механической системой (ИМС). Особенность конструкции состоит в том, что одни и те же элементы относятся как к одной, так и ко второй подсистемам, в состав которых в общем случае входят следующие элементы:

- опора, в виде основания или передвижных тележек напольного или подвесного типа;
- корпус робота различной формы с вмонтированными в него механизмами подъема и поворота руки и перемещения робота;
- корпус руки робота с вмонтированными в него механизмами перемещения руки, звена, а иногда, и захватного устройства;
- рука робота с одним или несколькими звеньями;
- захватное устройство.

Кинематическое и компоновочное решения влияют на конструктивное исполнение элементов, определяющее конструкцию робота, которая, в свою очередь, определяет его основные характеристики: число степеней подвижности, маневренность, сервис, систему координатных перемещений и вид системы координат, в которой они работают.

Рассмотрев определение числа степеней подвижности, можно перейти к рассмотрению маневренности манипулятора ПР. Под маневренностью M принято понимать число его степеней подвижности при неподвижном (зафиксированном в пространстве) положении его выходного звена (рабочего органа). Маневренность определяет возможность руки манипулятора выполнять сложные движения и обходить препятствия в рабочем пространстве при манипулировании с объектом или выполнении сложных операций.

Возможности конструкции ПР при совершении таких манипуляций характеризуются коэффициентом сервиса M . Коэффициент сервиса определяет возможность подхода рабочего органа (конечного звена) M к заданной позиции с различных направлений, что характеризует двигательные возможности манипулятора. Совокупность степеней подвижности манипулятора ПР определяет возможность его рабочего органа занимать различные положения в разных областях ограниченного конкретными связями и размерами звеньев кинематической цепи рабочего пространства M . Множество возможных положений оси рабочего органа манипулятора ПР, при неизменной позиции его характерной точки (его центра) в рабочем пространстве, формирует телесный угол ν , изображенный на рисунке 4.1, который принято называть углом сервиса, или пространственным углом обслуживания.

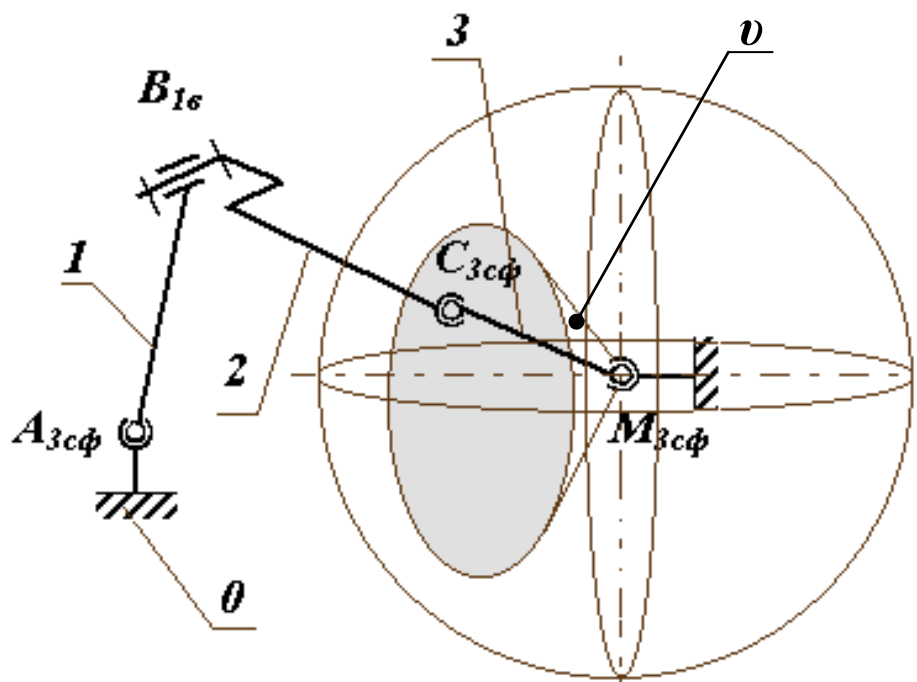


Рисунок 4.1 – Угол сервиса или возможный пространственный угол обслуживания (телесный угол ν , определяемый кинематическими свойствами механической системы промышленного робота)

Отношение угла сервиса к четырём π называют коэффициентом сервиса ξ в данной точке.

$$\xi = \frac{\nu}{4\pi} \quad (4.1)$$

Угол способен изменяться от нуля на границе рабочего пространства (поскольку там ось зазвата может занимать только одно положение) до единицы в точках зоны, так называемого, 100 %-ного (полного) сервиса, в которых захвата способна занимать любое пространственное положение. Помимо этого, используют среднее значение коэффициента сервиса в рабочем пространстве объема V . Называют его полным коэффициентом сервиса M промышленного робота

$$\xi_v = \frac{1}{V} \int_V \xi_i dV \quad (4.2)$$

Говоря о конструкциях промышленных роботов, следует обозначить требования к ним. Поскольку промышленные роботы являются структурным элементом РТС или РТК, то и требования к ним определяются условиями функционирования в этих системах. С этой точки зрения, все требования, предъявляемые к промышленным роботам, можно разделить на следующие группы:

- обеспечение функций и параметров гибкой производственной системы (ГПС);
- гибкость, сочетающая простоту и экономичность при переходе на другое изделие;
- простота и надежность работы в том числе в интервале температур от 0 °С до 50 °С;
- устойчивость работы в автоматических режимах;
- совместимость с сопрягаемым оборудованием (соответствие сложности ПР технологическому и вспомогательному оборудованию и оснастке (отсутствие избыточных универсальности и памяти), сопрягаемость ПР с оборудованием комплекса, возможность реализации управляющих воздействий на соответствующее оборудование, возможность автоматической перенастройки);
- экономичность работы при соответствующем числе степеней подвижности;

- точность (повторяемость) позиционирования с небольшим временем затухания колебаний в точке позиционирования ($\leq 0,2c$);

- высокая удельная грузоподъемность;

- высокая помехозащищенность.

По конструктивным признакам можно выделить следующие группы роботов:

а) напольные, стационарные (неподвижные) ПР;

б) подвесные тельферные ПР.

Первая группа, в свою очередь, может быть разбита на подгруппы:

- с выдвижной рукой и консольным механизмом подъема;

- с выдвижной рукой на подвесной каретке;

- с выдвижной рукой и наклоняющим ее корпусом;

- с многозвенной рукой;

- многорукие;

- со складывающейся рукой на подъемной каретке;

- с антропоморфной рукой.

Во второй группе можно выделить:

- с выдвижной рукой;

- с многозвенной рукой;

- со складывающейся рукой;

- многорукие.

Роботы, работающие в различных системах координат, также имеют различные конструктивные решения.

Характерные представители конструктивных групп ПР рассмотрены в справочной литературе, поэтому в виду ограниченности объема данных материалов здесь мы их приводить не станем.

Отметим еще одну особенность построения конструкций ПР. Конструкция может формироваться из оригинальных узлов, иметь модульный принцип построения и быть агрегатно-модульной.

Чтобы говорить о достоинствах и недостатках этих подходов к созданию конструкций определимся с терминами.

Определяя термин модуль, следует сказать, что это функционально законченное устройство, способное выполнять свое функциональное назначение при подведении к нему питания, управляющих и информационных связей (шин). Следует отметить, что модуль характеризуется наличием унифицированных присоединительных размеров и параметров внешнего сопряжения, обеспечивающих его функционирование. Применительно к ПР, различают кинематический исполнительный модуль, модуль-привод и модуль устройства управления. Их различия определяются их функциональным назначением.

Агрегат промышленного робота представляет собой совокупность узлов ПР, которая образует механизм, реализующий одну степень подвижности (независимое перемещение исполнительного органа по одной (или вокруг) из координатных осей одной из систем координат – локальной, региональной или глобальной. Движение агрегату передается от присоединяемого к нему привода. Для соединения и привод и агрегат имеют как унифицированные присоединительные размеры, так и параметры внешнего сопряжения. Примером агрегата может служить механизм в собранном виде, реализующий перемещение по одной из координат, но без присоединенного к нему привода. Таким образом, агрегат является частью исполнительного модуля, объединяющего в себе агрегат, двигатель, редуктор, передаточные механизмы (или их части), элементы и компоненты систем управления.

Особенностью оригинальных конструкций, является понятие уникальности ее элементов и узлов, с точки зрения их замены, в случае ремонта. Такие конструкции могут отличаться значительными преимуществами при эксплуатации в условиях, конкретно для которых они созданы, но при этом существенным недостатком является те, названные, свойства узлов и деталей, которыми обусловлено увеличение как материальных, так и временных затрат при их обслуживании и ремонте.

Возникающие противоречия обусловлены такими факторами как:

- стоимость;
- сложность конструкции;
- число используемых степеней подвижности;
- необходимая гибкость.

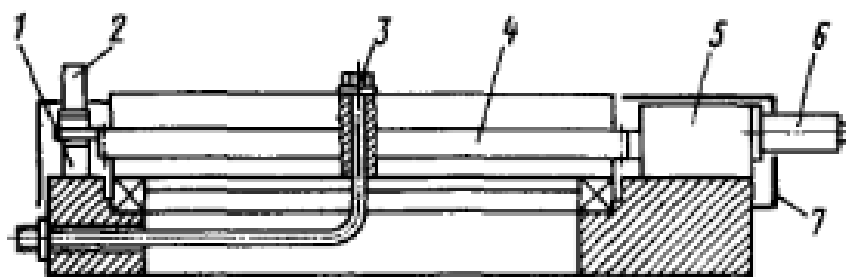
Один из путей разрешения этих противоречий представляет собой построение ПР на агрегатной основе.

Совсем по-другому обстоит дело с модульными конструкциями. Принцип модульного построения, представляет собой разновидность агрегатного построения. Он подразумевает создание ПР на базе функциональных модулей (узлов), которые имеют все необходимые элементы, в том числе и приводы, и датчики обратной связи и другие, которые являются необходимыми для обеспечения функционирования модуля. При создании ПР модули соединяются между собой в требуемой последовательности. После этого остается только произвести подсоединение к ним силовых и управляющих коммуникаций.

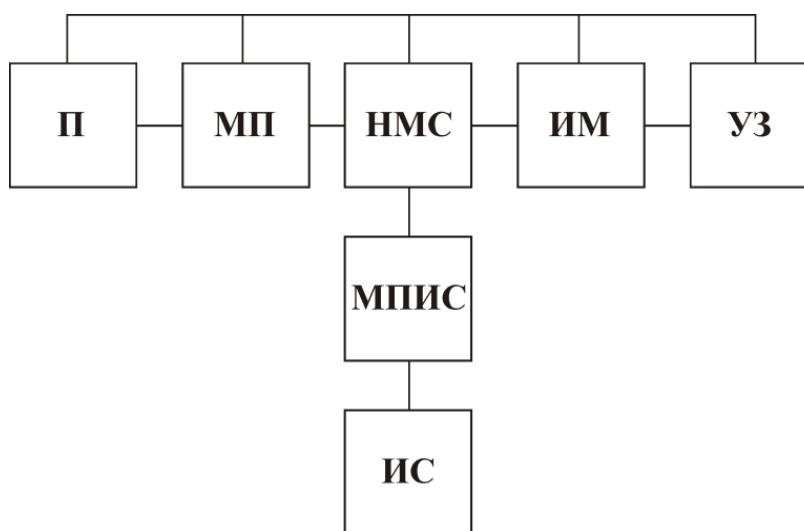
Для модульного принципа построения ПР, в отличие от агрегатного, характерным является значительно большее удобство создания и перестройки ПР. Кроме того этот принцип построения позволяет уменьшить число узлов, образующих конкретную модель ПР. Так же данный принцип лишен таких недостатков как увеличение номенклатуры модулей, обусловленное включением в модуль привода и датчиков обратной связи. Не возникают в данном случае и не оправданная сложность конструкции и «избыточность» модулей. Не возникает затруднений использования одних и тех же модулей совместно различными системами программного управления.

Наиболее прогрессивным в этом плане является использование многоуровневой модульной структуры схемно-компоновочного решения ПР. Её основу составляет многоуровневая модульная система построения манипулятора. Представляет она собой развитие концепции одноуровневой системы, которая базируется на модульном принципе построения, позволяя в случае необходимости формировать компоновки манипуляторов с различными степенями подвижности.

Рассмотрим классификацию устройств, образующих модуль, по функциональному признаку. В качестве примера разберем модуль поворота руки, схема которого представлена на рисунке 4.2.



a)



б)

Рисунок 4.2 – Модуль поворота ПР (a) и его структурная схема - типового модуля (б)

Функция НМС выполняется в модуле поворотным столом 4, функция исполнительного элемента привода (П) – электродвигателем 6, который имеет встроенный тахогенератор. Функции механизма преобразования движения (МП) выполняет редуктор 5, а информационной системы (ИС), соответственно, – датчик положения 2. Редуктор 1 выполняет функции механизма преобразования исполнительной связи (МПИС), а кабель 3 – устройств связи. Защиту от воздействий внешней среды реализует узел защиты (УЗ) – кожух 7.

Схема наглядно показывает возможность разработки конструкций путем использования модулей различного уровня. Например, модули первого уровня выполняют одну из функций модуля второго уровня. Модули же второго уровня, которые реализуют функцию как минимум одной координаты ПР создаются путем компоновки их из модулей первого уровня. Устройства связи относят к модулям второго уровня.

Описанный подход позволяет:

- максимально унифицировать модули первого уровня, которые входят в структуру модулей второго уровня;
- сократить затраты на создание модулей второго уровня, которые могут оснащаться различными приводами, исполнительными и информационными системами;
- исключить избыточность устройств связи, которая определяется компоновкой ПР.

Такой подход обеспечивает возможность независимого создания конструкции модулей первого уровня, отвечающих требованиям функционирования модулей второго уровня, что в значительной степени облегчает расчет конструкций составных частей робота с использованием стандартных методик расчет отдельных узлов и деталей.

Результатом этого является вывод о том, что для создания ПР различного назначения из рассмотренных методов невозможно выбрать один, который являлся бы оптимальным.

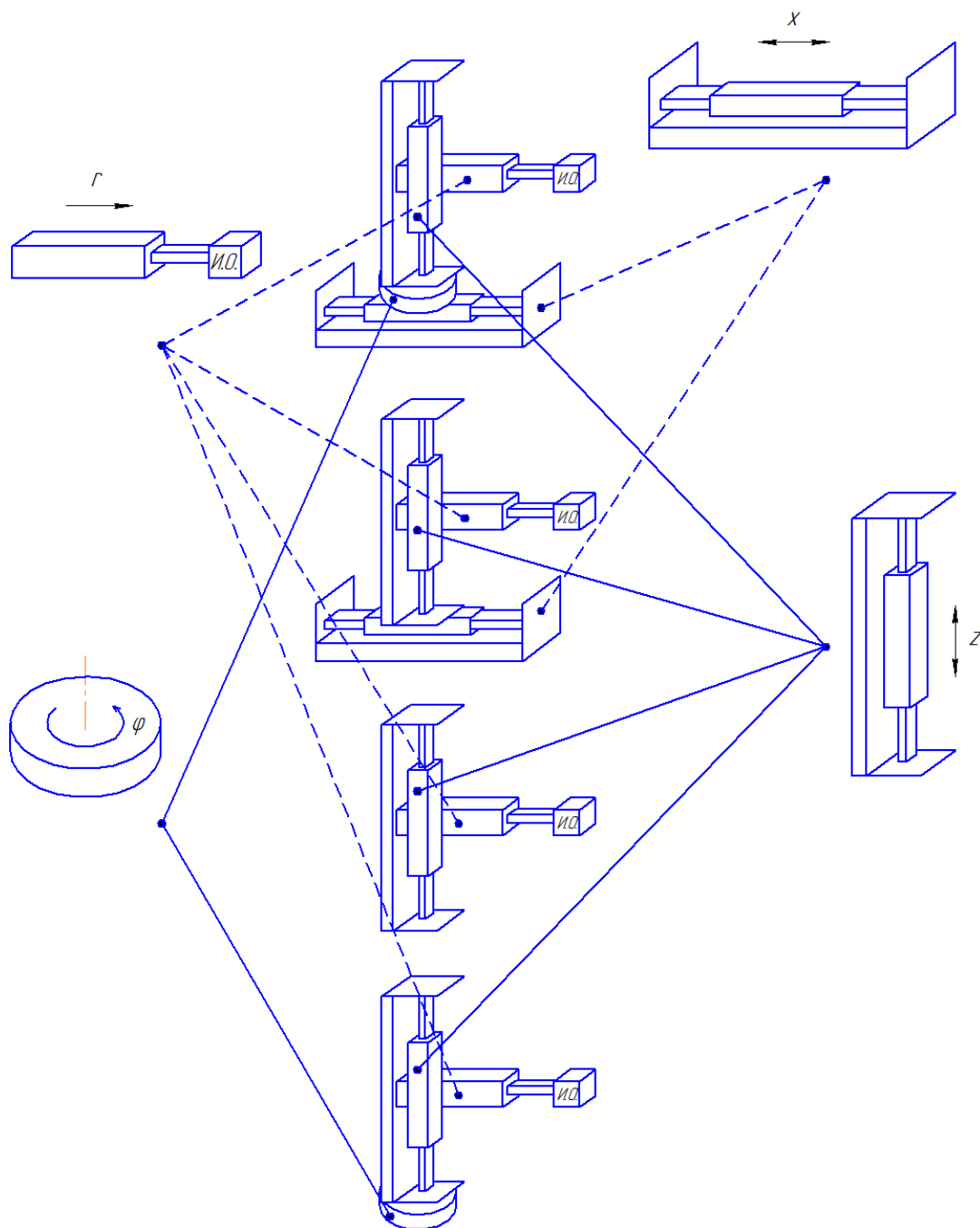
Агрегатно-модульные конструкции ПР обладают такими недостатками как ограничение используемой при создании манипулятора необходимой модели номенклатуры деталей и узлов, кинематических модулей. Эти ограничения способствуют появлению технологически неоправданного снижения функциональности ПР. В результате использования для формирования необходимых траекторий движения исполнительных органов ПР простейших функциональных узлов из ограниченного набора, которые обеспечивают одно или два вида простых движений, приводит к увеличению количества стыков, росту массы конструкции при одновременном снижении ее жесткости. Кроме того становятся хуже динамические характеристики и снижается точность. Иногда возникают менее выгодные с конструкторской точки зрения решения, которые в большей степени удовлетворяют принятым принципам агрегатного построения.

Агрегатно-модульные конструкции классифицируют по таким признакам как:

- компоновка системы;

- возможность изменения технических характеристик ПР не выходя за пределы одной агрегатной гаммы;
- применение систем программного управления.

В соответствии с первым признаком различают одностипные роботы, пример такой конструкции показан на рисунке 4.3, созданные на базе одной принципиальной компоновочной схемы, и разнотипные, позволяющие получать принципиально различные компоновки.



И.О. - исполнительный орган.

Рисунок 4.3 – Схема построения модификаций агрегатной гаммы

По возможности изменения технических характеристик различают три группы. Первую группу составляют ПР, у которых значения их основных технических показателей неизменны (*constanta*). Вторая группа – это модификации ПР, имеющие ограниченное разнообразие основных технических показателей. Третья же группа представляет собой целую гамму ПР, имеющих широкое назначение, позволяющих получать модификации, характеризующиеся большим разнообразием основных показателей. Согласно третьему признаку различают группы, которые комплектуют либо одним, либо различными типами систем программного управления, а так же агрегатные гаммы, которые позволяют комбинаторно комплектовать модификации манипуляторов различными типами систем управления на базе одного унифицированного ряда.

4.2 Принципы конструирования и расчётов промышленных роботов

Проектирование промышленных роботов, являющихся техническим средством гибкой производственной системы – сложная системная задача.

К основным техническим требованиям к этому средству стоит отнести:

- обеспечение функций и параметров гибкой производственной системы (РТС или ГПМ);
- гибкость (простота и быстрота переналадки) при переходе на другое изделие;
- устойчивость работы в автоматическом режиме;
- экономичность и эффективность (низкая стоимость и минимальные эксплуатационные расходы) при соответствии конструктивного исполнения сложности выполняемых работ;
- надежность включения/выключения и работы в интервале температур от 0 °С до 50 °С;
- соответствие удельных показателей по материалу- и энергоёмкости лучшим мировым образцам.

Перечисленные требования делают основополагающими следующие принципы [14]. Параметры робота определяют, руководствуясь результатами функцио-

нального анализа технологических факторов. Базируясь на экономической эффективности, следует минимизировать число степеней подвижности и перемещения при максимально допустимой погрешности позиционирования. Выбор рациональной кинематической схемы и компоновки ПР следует выполнять совмещая рабочие зоны технологического оборудования и уменьшая число вариантов подхода в эти зоны рабочего органа манипулятора ПР.

При выборе компоновки и кинематики ПР пользуются методом многокритериальной оценки, учитывая при этом:

- относительный объем и форму рабочей зоны;
- соответствие траекторий рабочего органа требованиям технологического процесса;
- возможности системы управления реализации одновременного движения по нескольким степеням подвижности с требуемыми параметрами;
- площадь ГПМ;
- простоту конструкции.

Динамические параметры работа следует определять, основываясь на производительности ГПМ, параметрах перемещений рабочего органа за цикл. Производительность и объем выпуска ГПМ должны соответствовать требуемой норме рентабельности его внедрения в производство.

Погрешность позиционирования определяют, базируясь на технологических требованиях и используя коэффициент запаса K_{Δ} , значения которого принимают от 1,2 до 1,3. Распределяя погрешности позиционирования по степеням подвижности, следует учитывать векторное их представление, значения перемещений по степеням подвижности, разрешающие способности датчиков положения и технологию изготовления элементов конструкции.

Проектируя механическую систему ПР, учитывают особенность ее конструкции, заключающуюся в том, что, как уже отмечалось, образована она взаимосвязанными несущей механической системой (НМС) и исполнительной механической системой (ИМС). При этом, каждая из них имеет свое функциональное назначение. Несущая механическая система несет силовую нагрузку и формирует объем и фор-

му рабочей зоны Исполнительная механическая система обеспечивает динамические характеристики и параметры точности ПР. Образована она системой механизмов передвижения звенья несущей механической системы.

При расчете несущей механической системы используют следующий порядок:

- исходя из необходимой траектории движения в процессе манипулирования объектом, габаритных размеров основного технологического оборудования и технологической оснастки определяется кинематическая структура и размеры (длина) звеньев НМС манипулятора;

- учитывая требования к грузоподъемности рук манипулятора и требования точности (повторяемости) позиционирования находят допустимое значение нижнего предела первой гармоники собственной частоты колебаний НМС;

- найденное таким образом значение нижнего предела позволяет определить конструкцию и размеры звеньев манипулятора и его узлов.

Последовательность же расчета исполнительной механической системы такова:

- сначала выбирается структура ИМС и связи между ее отдельными элементами (передающие механизмы и связи, места связей этих механизмов с различными датчиками положения и скорости, при их наличии). Выбор осуществляется на основании заданных условий реализации требуемой грузоподъемности, точности, максимальных скоростей перемещения исполнительного органа (ИО) и предварительно определенного типа и схемы привода;

- следующим шагом является расчет передаточного числа и выбор тип передающего, а так же исполнительного механизмов и связей для передачи движения;

- в заключении находят соответствующие размеры передающих связей и жесткость остальных необходимых элементов ИМС.

Перемещения элементов ориентирующего механизма вычисляют, основываясь на анализе изменения положений объекта манипулирования или рабочего органа по отношению к положению выходного звена несущей механической системы в ходе выполнения транспортирующих движений.

Проектирование роботов следует проводить в соответствии с этапами и последовательностью, как показано на рисунке 4.4, в соответствии с ГОСТ Р 15.201 – 2000 [15].



Рисунок 4.4 – Этапы проектирования промышленных роботов

При определении жесткости механической системы учитывают допустимые смещения рабочего органа в процессе позиционирования под действием сил инерции. Деформационной составляющей обусловленной действием сил тяжести пренебрегают, учитывая ее при программировании. Допустимые деформации распределяют между НМС и ИМС. На долю деформаций НМС приходится от 85 % до 95 % от общего баланса деформаций. Доля же деформаций ИМС может составлять от 5 % до 15 %. Определяется она используемым передаточным механизмом. Использование шариковинтовых передач обеспечивает долю деформации от 3 % до 5 % от общего баланса, зубчатых передач – от 5 % до 8 %, а волновых – от 10 % до 15 %.

При выполнении расчета на жесткость НМС, используемая расчетная модель должна учитывать:

- массу и расположение объекта манипулирования и рабочего органа, ориентирующего механизма, передаточных механизмов и звеньев;
- контактную податливость узлов соединения звеньев.

Для уравнивания перемещающихся узлов встраивают устройства, называемые балансиром, на базе пневмо- или пневмогидропривода.

Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные элементы входящие в конструкцию ПР.
- 2 Перечислите требования предъявляемые к конструкциям ПР.
- 3 На какие группы делятся ПР по конструктивным признакам?
- 4 Что такое "модуль" и "агрегат"?
- 5 Достоинства и недостатки модульного принципа построения ПР.
- 6 Назовите недостатки агрегатно-модульных конструкций ПР?
- 7 Перечислите технические требования при проектировании ПР?
- 8 Назовите порядок применяемый при расчёте несущей механической системы?
- 9 Перечислите этапы проектирования ПР.

5 Захватные устройства

Захватные устройства (ЗУ) манипуляторов (М) промышленных роботов (ПР) предназначены для захватывания и надежного удержания в требуемом положении объектов манипулирования или манипулирования ими в процессе транспортировки, а так же загрузки/разгрузки технологического оборудования [16]. Объекты манипулирования имеют разнообразные форму, размеры и массу, обладают различными физическими свойствами и относятся к числу сменных элементов ПР.

Одним из важнейших элементов, требующим особого отношения при разработке конструкции является захватное устройство. Это объясняется тем, что ЗУ хотя и не принято считать частью структуры манипулятора, поскольку этот элемент, как правило, является сменным, тем не менее, именно от его свойств и возможностей в значительной мере зависит качество работы ПР. Работа с объектами различной формы и свойств определяет необходимость использования, как правило, сменных ЗУ. На выбор схвата влияет форма, масса, физико-механические и физико-химические свойства объекта. Захватное устройство должно правильно и надежно удерживать объект, не повреждая его. Иллюстрации использования некоторых типов схватов приведены на рисунке 5.1 [17].

Цилиндрическими деталями большой массы, например, можно манипулировать с помощью схвата клещевого типа, представленного на рисунке 5.1, а. На губках 2 захвата закреплены вкладыши 3, имеющие цилиндрическую внутреннюю поверхность. Губки приводятся в движение при перемещении клина 1.

Как показано на рисунке 5.1, б зажим деталей типа фланцев, коротких цилиндров и втулок может осуществляться универсальным ЗУ с тремя пальцами 2 (I, II, III). При этом “кисть” 1 способна поворачиваться на валике 3. Пальцы перемещаются с помощью винтового механизма, приводимого в движение сжатым воздухом, давление которого составляет от 50 до 70 Па.

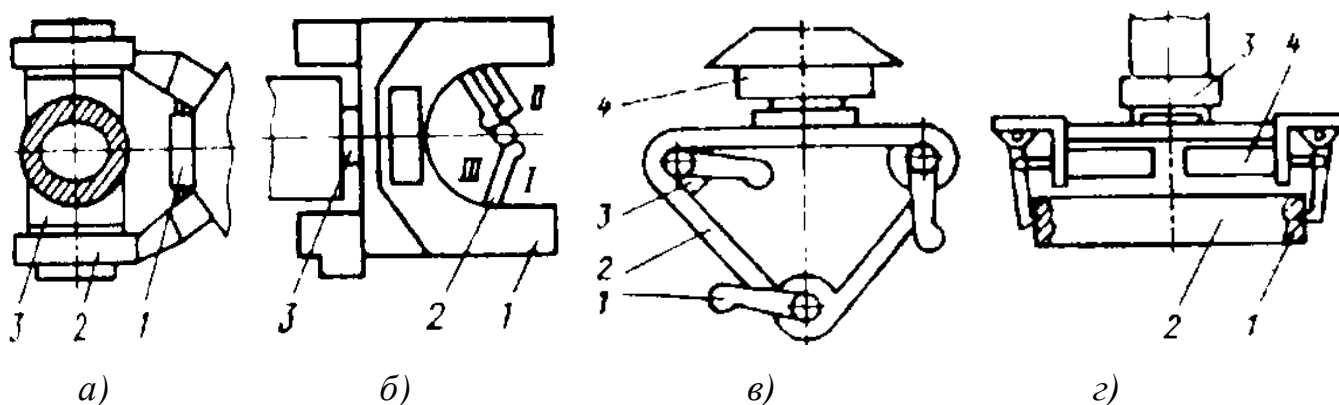


Рисунок 5.1 – Варианты конструкций захватных механизмов роботов

Транспортировка емкостей или труб большого диаметра из пластмасс или жести может осуществляться с помощью захвата 4, изображенного на рисунке 5.1, в. Захват образован рамой 2 и установленными на осях, закрепленных в углах рамы звездочками 3. На этих же осях звездочек закреплены три одинаковых кулачка 1, получающих вращение через цепь от гидро- или пневмоцилиндров.

На рисунке 5.1, г изображено ЗУ 3 для переноса валиков 2, имеющих центровочные отверстия или подобных объектов. Захват выполнен в виде угольников с кронштейнами 1. На кронштейнах установлены центровочные бортики, входящие с обеих сторон в центровочные отверстия вала 2. Зажим осуществляют пневмоцилиндры 4.

Операции, производимые роботом, например, с листовыми материалами и изделиями сложной формы из стекла могут выполняться с применением вакуумных захватов. Электромагнитные захваты, отличающиеся простотой конструкции, высокой скоростью срабатывания и большим удельным значением удерживающей силы, используют для объектов из магнитных материалов большой массы. Захваты с эластичными камерами, например, из полимерных пленок или резины используют для объектов из хрупких материалов и сложной геометрической формы. Кроме того, основу конструкций многих захватных устройств представляют рычажные, клиновые или винтовые механизмы.

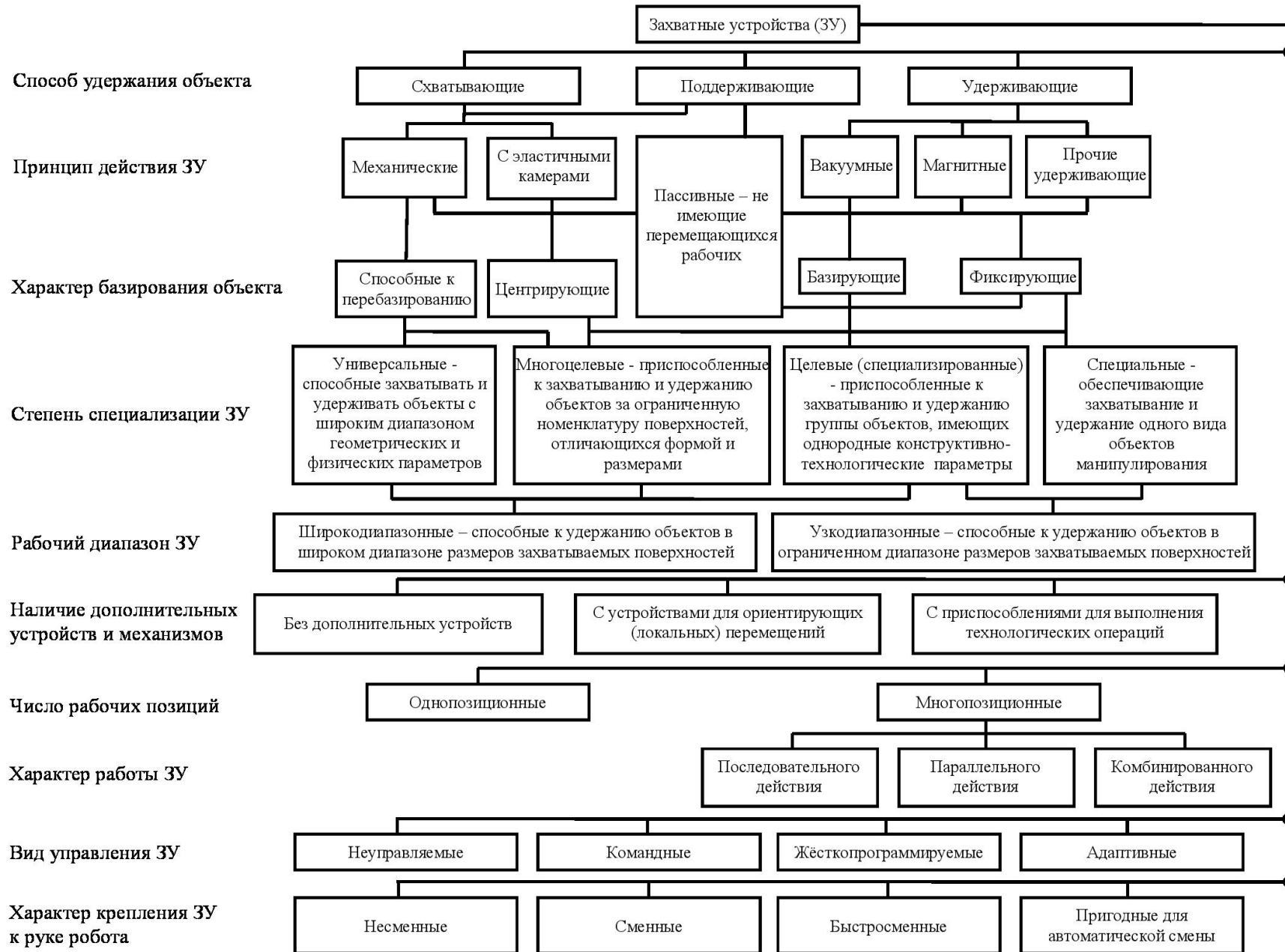


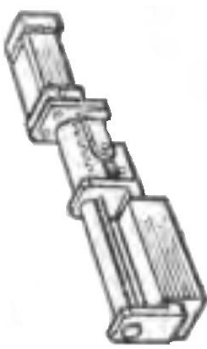

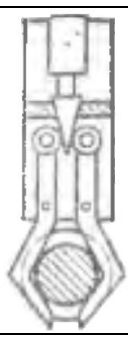



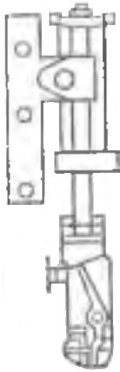

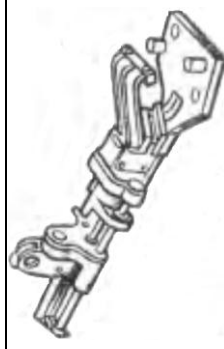
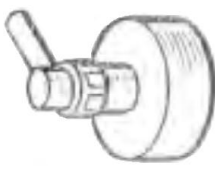
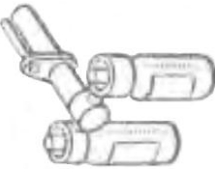

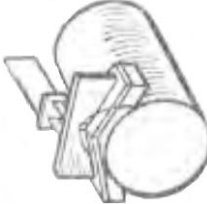



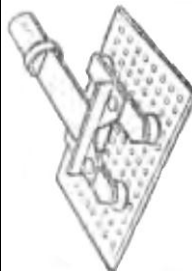
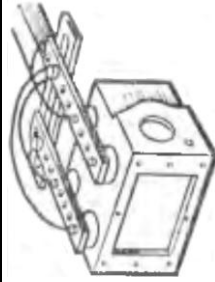



Рисунок 5.2 - Классификация захватных устройств

Таблица 5.1 – Примеры конструкций хватных устройств

Детали		Тела вращения		Плоские детали	Детали коробчатой формы	Детали сложной формы	
		фланцы	валы				
1		2	3	4	5	6	
Механические устройства	центрирующие	широкодиапазонные			-		-
		узкодиапазонные					-
	базирующие		-				
Устройства с эластичными камерами				-	-		

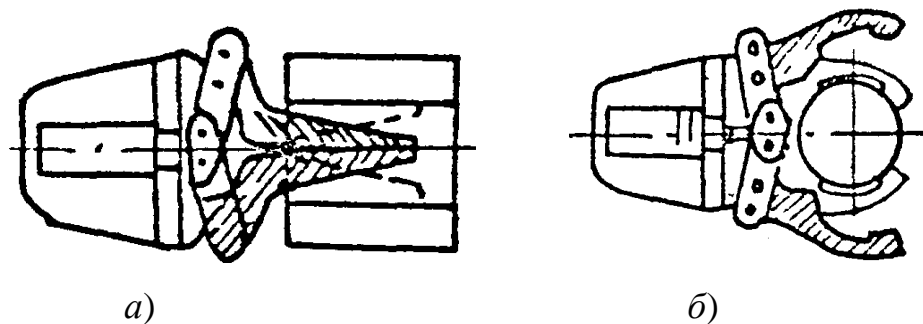
Продолжение таблицы 5.1

		1	2	3	4	5	6
Вакуумные и магнитные устройства	центрирующие		-		-		
	базирующие			-			

На рисунке 5.2 представлена классификация хватных устройств [18]. В таблице 5.1 приведены примеры конструкций ЗУ, распределённые в соответствии с отдельными классификационными признаками.

На рисунке 5.2 представлены клещевые хватные устройства с гидравлическим приводом и системой, так называемых, ломающихся рычагов, позволяющих создавать значительные усилия при захвате объекта.

Характерным для рассмотренных конструкций является размещение силового агрегата (гидроцилиндра) в промежутке между шарнирно закреплёнными планками. Сами же планки связаны с рычажным механизмом. К самим планкам крепятся сменные зажимные губки. Смена губок позволяет обеспечивать захват объектов за различные по форме поверхности, например, за внутреннюю (рисунок 5.2, *а*) или за наружную (рисунок 5.2, *б*) поверхность.



a - система ломающихся рычагов со сменными губками, обеспечивающие захват объекта за внутреннюю поверхность; *б* – захватное устройство аналогичного типа, по для захватывания объекта за наружную поверхность.

Рисунок 5.2 –Механические захватные устройства клещевого типа с рычажными передаточными механизмами

Рычажное захватное устройство схема которого приведена на рисунке 5.3 имеет сменные рабочие губки. Это позволяет использовать захватное устройство для работы с деталями, имеющими различные формы.

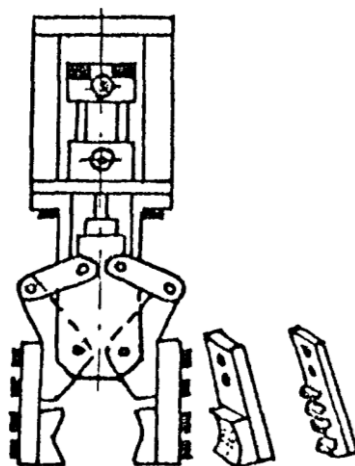


Рисунок 5.3 – Широкодиапазонное захватное устройство со сменными рабочими губками

Конструкция вакуумных захватных устройств использует присоски, в которых вакуум создается специально предназначенными для этого устройствами. Одна из наиболее распространенных конструкций таких устройств основана на использовании эжекторов, позволяющих получить разрежение, используя для этого

энергию сжатого воздуха из заводской пневматической сети. Для изготовления присосок могут использоваться либо резина либо пластик. Конструкция присоски с шаровой опорой, обеспечивающей крепление к патрубку под любым углом, приведена на рисунке 5.4. Как правило объект захватывается несколькими такими присосками.

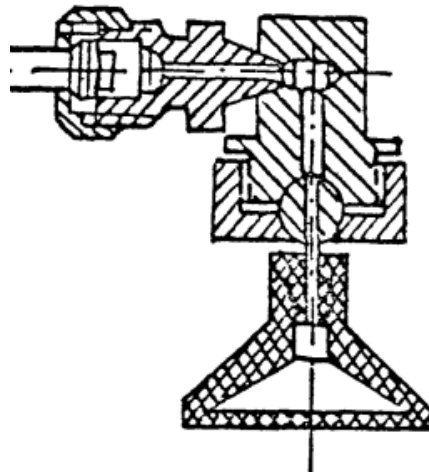


Рисунок 5.4 – Пневмоприсоска с шаровой опорой

Для механизмов захвата, как и для степеней подвижности манипуляторов, используются те же типы приводов, обеспечивающих требуемое перемещение губок и усилие зажима. В дополнение к уже рассмотренным нами особенностям гидроприводов отметим, что этот тип привода не используют для зажима схватов при работе с нагретыми объектами. Это обусловлено тем, что может произойти возгорание уплотнительных прокладок, а так же изменение коэффициента вязкости гидрожидкости.

Контрольные вопросы

- 1 Почему хватные устройства относятся к числу сменных элементов ПР?
- 2 Какие факторы влияют на правильный выбор хватного устройства?
- 3 Перечислите классификационные признаки хватных устройств.
- 4 Опишите конструкции хватных устройств для детали коробчатой формы.
- 5 Назовите основные элементы вакуумных хватных устройств.
- 6 Почему гидропривод не используют для зажима схватов при работе с нагретыми объектами?

Список использованных источников

- 1 Белянин, П. Н. Промышленные роботы и их применение: робототехника для машиностроения / П. Н. Белянин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983. - 312 с.
- 2 Шишмарёв, В. Ю. Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарёв. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
- 3 Схиртладзе, А. Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учебник / А. Г. Схиртладзе, В. Н. Воронов, В. П. Борискин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2009. – 612 с.
- 4 Житников, Ю. З. Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учебник для машиностроительных вузов / Ю. З. Житников, Б. Ю. Житников, А. Г. Схиртладзе [и др.]; под общ. ред. проф. Ю. З. Житникова. – 2-е изд. Перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 656 с.
- 5 ГОСТ 25686 - 85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения. - Введ. 1986-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 6 с.
- 6 Юревич, Е. И. Основы робототехники: учеб. пособие для вузов / Е. И. Юревич. - 2-е изд. - СПб.: БВХ - Петербург, 2007. - 416 с.
- 7 Попов, Е. Н. Роботехника / под ред. Е. Н. Попова, Е. И. Юревича. - М.: Машиностроение, 1984. - 288 с.
- 8 ГОСТ 25685 - 83. Роботы промышленные. Классификация. - Введ. 1984-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1983. - 6 с.
- 9 Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы: справочник / Ю. Г. Козырев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1988. - 392 с.
- 10 Карнаухов, Н. Ф. Электромеханические и мехатронные системы: учеб. пособие / Н. Ф. Карнаухов. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. - 320 с.
- 11 Аншин, С. С. Проектирование и разработка промышленных роботов / под ред. Я. А. Шифрина, П. Н. Белянина. - М.: Машиностроение, 1989. - 272 с.
- 12 Большая советская энциклопедия: в 30-ти т. / гл. ред. А. М. Прохоров. Т. 12.

Кварнер-Конгур. - 3-е изд. - М.: Сов. энциклопедия, 1973. - 623 с.

13 Промышленные роботы в машиностроении: альбом схем и чертежей: учеб. пособие для технических вузов / Ю. М. Соломенцев, К. П. Жуков, Ю. А. Павлов и др.; под общ. ред. Ю. М. Соломенцев. - М.: Машиностроение, 1986. - 140 с.

14 Егоров, О. Д. Механика и конструирование роботов: учеб. для вузов / О. Д. Егоров. - М.: Станкин, 1997. - 510 с.

15 ГОСТ Р 15.201 - 2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Введ. 2001-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 2001. - 12 с.

16 Москвичев, А. А. Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов: учебное пособие / А. А. Москвичев, А. Р. Кварталов, Б. В. Устинов. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2015. - 176 с.

17 Челпанов, И. Б. Схваты промышленных роботов / И. Б. Челпанов, С. Н. Колпашников. - Л.: Машиностроение, 1989. - 288 с.

18 Козырев, Ю. Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов: учеб. пособие / Ю. Г. Козырев. - М.: КНОРУС, 2010. - 312 с.