

С. К. ЛЕБЕДЕВ, А. Р. КОЛГАНОВ

**КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА
ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ
В РОБОТОТЕХНИКЕ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 621.865.8
ББК 32.816
Л33

Научный редактор :
доктор технических наук *А. Б. Виноградов*

Рецензент :
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматизированного электропривода и мехатроники
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет
имени Г. И. Носова» *А. С. Сарваров*

Лебедев, С. К.

Л33 Кинематика и динамика электромехатронных систем в робототехнике : учебное пособие / С. К. Лебедев, А. Р. Колганов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 352 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0689-5

Представлены основные теоретические аспекты построения кинематических схем роботов и манипуляторов, анализа их динамического поведения и синтеза систем управления. Предлагается использование метода однородных координат в качестве основного инструмента при формировании кинематических и динамических моделей роботов и манипуляторов.

Для студентов и аспирантов электротехнических направлений подготовки. Может быть полезно специалистам в области электромехатронных систем в различных областях народного хозяйства.

УДК 621.865.8
ББК 32.816

ISBN 978-5-9729-0689-5

© Лебедев С. К., Колганов А. Р., 2021
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ВВЕДЕНИЕ

Материалы учебного пособия сформированы в соответствии с программой дисциплины «Управление движением промышленных манипуляторов», входящей в учебные планы очной и заочной подготовки бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика». В Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина (ИГЭУ) подготовка в рамках этой дисциплины ведется на электромеханическом факультете кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭП и АПУ). Дисциплина входит в вариативную часть учебных планов, и является дисциплиной по выбору.

В июле 2020 года кафедре ЭП и АПУ исполнилось 90 лет. Все эти годы кафедра ведет успешную подготовку выпускников, которая традиционно нацелена на формирование компетенций в производственно-технологической, проектно-конструкторской и исследовательской деятельности при проектировании, монтаже, наладке и эксплуатации систем электропривода и автоматики любой отрасли промышленности. При этом используются инновационные технологии обучения и контроля качества подготовки, основанные на интерактивной работе студентов на уникальном и типовом промышленном оборудовании в специализированных лабораториях кафедры. Студенты приобретают в процессе обучения навыки программирования и наладки промышленных контроллеров и электроприводов зарубежных и отечественных производителей. Все это делает выпускников кафедры востребованными на многих объектах – от «прохладной» сибирской нефтегазодобычи до «теплых» цехов тепловых и атомных станций.

Данное учебное пособие отражает научные, учебные и методические материалы, обобщающие опыт авторов более чем за 20-летний период чтения лекций, проведения практических занятий, формирования лабораторных практикумов, курсового и дипломного проектирования, руководства выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры по тематике, связанной с робототехникой.

За свою долгую и славную историю кафедра ЭП и АПУ не раз являлась новатором и «донором», формируя на своей основе новые направления и профили подготовки. Это и выпуск специалистов городского электрического транспорта, систем автоматизации проектирования, промышленной электроники, электротехнологии, и, в том числе, подготовка специалистов в области робототехники, которая планировалась в ИГЭУ в 90-е годы прошлого века в связи с развитием станкостроения в Ивановской области. Распад СССР и связанные с этим негативные тенденции в

промышленности и высшей школе привели к тому, что вместо выпуска специалистов по робототехнике кафедра ЭП и АПУ, изменив учебные планы, вела подготовку части инженеров со специализацией по робототехнике. В настоящее время эта тематика представлена элективным компонентом учебного плана в качестве одной из двух дисциплин по выбору студента.

Преподавание дисциплины ведется на 4-м, завершающем подготовку бакалавров, курсе (7-й и 8-й семестры). К этому времени студенты овладевают необходимыми компетенциями, изучая такие дисциплины, как «Теория автоматического управления», «Механика», «Прикладная механика», «Программные средства в математике и расчетах мехатронных систем», «Электрический привод». Параллельно с дисциплиной «Управление движением промышленных манипуляторов» студенты в те же семестры изучают дисциплины «Системы управления электроприводов», «Моделирование электропривода», дающие ряд необходимых компонентов знаний и навыков, особенно важных при разработке систем управления такими объектами, как промышленные манипуляторы.

Цель преподавания дисциплины «Управление движением промышленных манипуляторов» – сделать бакалавра профиля «Электропривод и автоматика» способным участвовать в разработке, внедрении и эксплуатации элементов робототехники, промышленных манипуляторов, электро-мехатронных систем позиционирования в промышленности, энергетике, транспорте, военной и космической технике.

Основными задачами, решение которых обеспечит достижение поставленной цели, являются задачи кинематического и динамического анализа механики промышленных манипуляторов, освоение алгоритмов синтеза и анализа систем позиционирования звеньев манипулятора, знакомство с основами промышленной робототехники, включая историю развития, аспекты технико-экономического анализа и классификацию промышленных роботов.

Значительное внимание в учебном пособии уделяется как вопросам теоретического анализа характеристик динамических систем, включая классические временные и частотные характеристики, так и вопросам анализа характеристик и имитационного моделирования с использованием современных программных комплексов.

Основы промышленной робототехники. Раздел посвящен экскурсу в историю развития промышленной робототехники. Здесь приводятся критерии и факторы, используемые при решении о внедрении робототехнических систем, как при разработке новых проектов, так и при модернизации оборудования в промышленности. Рассмотрение целого ряда классификаций робототехнических систем погружает читателя в многогранный и обширный мир промышленной робототехники, ненавязчиво знакомя с ос-

новными видами промышленных роботов и их функциональными особенностями.

Метод однородных координат в кинематике и динамике манипуляторов. В разделе рассмотрены вопросы теории и методики применения однородных координат для формирования математических моделей, обеспечивающих анализ и синтез промышленных манипуляторов различной конфигурации. При этом детально рассматриваются алгоритмы выполнения, как кинематического, так и динамического анализа. Форма полученных результатов анализа максимально способствует цели и задачам разработки систем управления движением манипуляторов.

Функциональная структура системы управления движением манипулятора. В разделе на основе детального анализа двух примеров взаимодействия манипуляторов с технологическим оборудованием представлено формирование требований к системам управления движением манипуляторов. Сформулированы допущения при рассмотрении приводов шарниров и сформирована обобщенная структура системы управления движением, элементы которой ставят задачи при проведении кинематического и динамического анализа конкретного манипулятора.

Кинематический анализ промышленных манипуляторов. На примере манипуляторов с вертикальной и горизонтальной цилиндрическими системами координат приводится с описанием каждого этапа получение кинематических моделей. Полученные результаты кинематического анализа подвергаются детальному анализу. Он проводится с использованием компьютерного моделирования для проверки уравнений связи и их решения перед использованием в системе управления движением для организации координатных преобразований сигналов.

Динамический анализ промышленных манипуляторов. Раздел посвящен использованию уравнения Лагранжа при решении прямой задачи динамики для конкретного манипулятора с целью получения математической модели манипулятора как объекта управления. Для тех же вариантов манипуляторов, для которых выполнен кинематический анализ, подробно описано получение уравнений движения и формирование структуры моделей, обеспечивающих реализацию, как синтеза, так и анализа системы управления движением манипуляторов.

Использование регуляторов положения в системах позиционирования звеньев манипуляторов. Рассматривается многообразие вариантов построения систем позиционирования на основе использования регуляторов положения. Предлагаются варианты структурно-параметрического синтеза, как статических систем управления, так и систем с астатизмом 1-го и 2-го порядка. Показана всесторонняя оценка при выборе модели динамики систем позиционирования для манипуляторов. Предлагается алгоритм настройки параметров регуляторов положения, обеспечивающий во

всех вариантах реализацию преимуществ, которые дает использование настроек, соответствующих динамике Бесселя.

Исследование систем позиционирования звеньев манипуляторов. В разделе описаны методики анализа и выбор вариантов систем позиционирования для звена манипулятора средствами компьютерного моделирования с имитацией силовых и параметрических воздействий, возникающих при работе манипулятора. Предлагается использовать фиксированную настройку регуляторов в условиях существенного изменения инерционности звеньев при изменении конфигурации манипулятора в процессе функционирования. Приведены *Simulink*-модели с пояснениями по их применению для исследования систем позиционирования.

Компьютерное моделирование и исследование движения схвата манипулятора по заданной траектории. В разделе представлены *Simulink*-модели и детально описывается процесс компьютерных испытаний разработанных систем управления движением совместно с кинематическими и динамическими моделями манипуляторов. Материал раздела является основой для курсового проектирования и выполнения выпускных квалификационных работ по тематике, связанной с промышленной робототехникой.

Для контроля качества усвоения материала в заключении каждого раздела содержится перечень вопросов и заданий для самоконтроля, выполнение которых должно стать, по нашему мнению, для читателя обязательным. Контрольные материалы особенно востребованы при заочной и дистанционной формах обучения.

Авторы выражают искреннюю признательность руководству и коллективу кафедры ЭП и АПУ ИГЭУ за замечания, пожелания по развитию курса, а также за дружественную и творческую атмосферу, в которой происходила подготовка и обсуждение материалов учебника.

Авторы выражают особую благодарность доктору технических наук, профессору А. Б. Виноградову за полезные советы и замечания по улучшению содержания книги в процессе научного редактирования.

Авторы благодарны за внимательное, объективное рецензирование и ценные замечания и рекомендации доктору технических наук, профессору А. С. Сарварову (кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет» имени Г. И. Носова).

Эта книга написана для будущих студентов, а многие выпускники увидят в ней и свои труды, и муки творчества их педагогов.

ГЛАВА 1

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

1.1. РАЗВИТИЕ РОБОТОТЕХНИКИ

Наряду с эволюционным развитием автоматизация промышленности претерпела ряд скачкообразных изменений [19,20]:

- внедрение взаимозаменяемости в производстве;
- появление сборочных конвейеров, поточных линий (заводы Форда, текстиль, УНРС и т.д.);
- роботизация промышленности.

Внедрение промышленных роботов – это воплощение современного этапа развития автоматизации производства.

Кратко рассмотрим историю развития роботов. С древних времен людей увлекала мечта создать такую умную машину, которая бы действовала так же искусно, как и человек. Умельцы, используя хитроумные механизмы, создавали марионетки и заводные куклы. В умах фантастов зарождались роботы самого различного назначения. Предпосылки появления промышленной робототехники связаны и с бурным развитием науки и техники, связанным со 2-й мировой войной. В 40-е и 50-е годы интенсивно развивались механика, электроника, теория автоматического управления. В начале 60-х годов начались исследования, связанные с управлением механической рукой с помощью ЭВМ, исследования в области технического зрения.

Интересный экскурс в историю развития роботов дает Джозеф Фредерик Энгельбергер (англ. *Joseph Frederic Engelberger*, 25.07.1925 – 1.12.2015 г. г.) – американский инженер, изобретатель, один из основателей компании «Юнимейшн», вошедшей в «Вестингауз» [20]:

1954 год; Джордж Чарльз Девол-младший (англ. *George Charles Devol, Jr*, 20.02.1912 – 11.04.2011 г. г.) подает заявку на первый патент по робототехнике (1961 год – получение патента);

1956 год; Девол-младший и Энгельбергер (случайная встреча на коктейле) образуют фирму «Юнимейшн»; эффективность усилий специалистов фирмы «Юнимейшн» можно оценить по следующим цифрам: в те годы устройство ЧПУ для станков стоило 35 000 долларов, а специалисты «Юнимейшн» создали устройство управления роботом стоимостью 7 000 долларов (1959 год);

1961 год; введен в эксплуатацию первый промышленный робот «Юнимейт» на литейных участках завода «Дженерал Моторс» в Нью-Джерси (США); некоторые из этих роботов отработали по 100 000 часов, то есть 50 человеко-лет работы;

1970 год; создан промышленный робот с 6 степенями подвижности, но наиболее плодотворной оказалась для развития робототехники почва в Японии;

1967 год; Энгельбергер делает доклад перед более чем 700 промышленниками и специалистами;

1968 год; фирма «Кавасаки» (капитал около 3 миллиардов долларов) купила лицензию на всю технологию фирмы «Юнимейшн»;

1971 год; образована первая в мире ассоциация по роботам *JIRA* в Японии из 48 фирм (в США – только в 1975 году появился Американский институт робототехники); в дальнейшем робототехника уже из Японии начинает проникать в США и другие страны мира;

1982 год; фирма «Фанук» совместно с «Дженерал Моторс» начинает выпускать в США промышленные роботы. К робототехнике подключаются: «Дженерал Электрик», «Фольксваген», «Рено», «Си-менс», «Фиат».

К функциям, которыми должен обладать робот, в первую очередь, можно отнести следующие четыре (рис. 1.1):

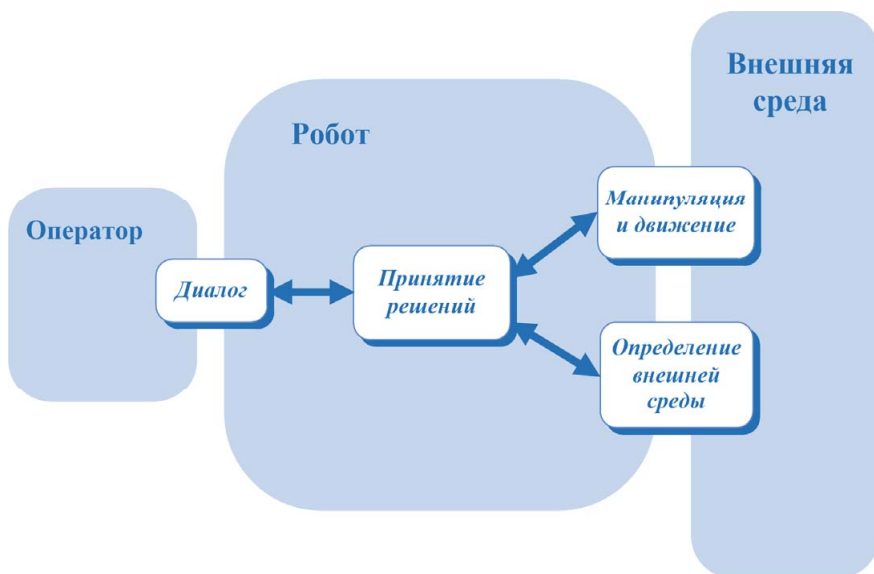


Рис. 1.1. Функциональная структура промышленного робота

- функция определения состояния внешней среды. Робот должен обладать искусственными органами чувств, позволяющими ему «видеть», «осязать», «чувствовать» силу, а также распознавать объекты;

- функция осмысления и принятия решения; она дает возможность планировать последовательность операций, необходимых для достижения цели, стоящей перед роботом;
- функция диалога; она обеспечивает эффективную связь человека с роботом, работа с другим оборудованием.

С помощью комплексной реализации этих четырех функций можно создать промышленный робот.

1.2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Можно говорить о преимуществах робота перед рабочим, оператором технологического оборудования.

Но при внедрении роботов и манипуляторов полезнее считать, что преимущество имеет человек, достойный более осмысленной работы, чем та, которой могут заниматься роботы [20] (табл. 1.1).

Т а б л и ц а 1.1

Характеристики промышленного робота и человека

№	Характеристика	Робот	Человек
1	Сила	0,1÷1000 кг полезной нагрузки	≤ 30 кг, сильно зависит от типа движения, направления и т. п.
2	Мощность	Зависит от полезной нагрузки	2 л. с. в течение 10 с; 0,5 л. с. – 120 с; 0,2 л. с. – продолжительное время
3	Стабильность	Абсолютная в отсутствии неполадок	Низкая, зависит от физической и психологической усталости, необходим внешний контроль результатов
4	Индивидуальные отличия	Только если предусмотрены проектом	До 100÷150 % отклонения от типовых характеристик
5	Срок службы	Ожидаемый срок службы – 40.000 часов (20 лет односменной работы)	

Факторы, определяющие области эффективного применения промышленных роботов:

- выполнение монотонных повторяющихся операций, для которых не требуется или требуется мало умственной энергии;
- очень утомительные и опасные работы (горячие цеха, опасная атмосфера и т. д.);
- работы, требующие от оператора высокой повторяемости при выполнении сложных повторяющихся операций;
- работы, требующие перемещения больших тяжестей, непосильных для человека или настолько утомительных, что человек не выдерживает целую смену.

Приведем ряд примеров, где в одном производстве сочетаются сразу несколько факторов, указывающих на необходимость применения роботов:

- литейное производство (значительная масса отливок, повышенная температура, запыленность, загазованность, высокая повторяемость операций);
- сварочное производство (высокая повторяемость, точность, опасность, монотонность);
- окраска распылением (точность, повторяемость, опасная атмосфера);
- сборочное производство (большие тяжести, повторяемость);
- технический контроль (точность, повторяемость, объективность).

В решении вопроса о применении роботов возможны три случая:

- задание должно выполняться человеком, так как оно не может быть выполнено ни одной из существующих моделей из-за его высокой сложности;
- задание должно выполняться только роботом по соображениям безопасности, ограниченности рабочего пространства или особых требований к точности;
- робот может заменить человека при выполнении задания.

Рассмотрим подходы к экономическому обоснованию применения промышленных роботов [21,22]. В оценке эффективности внедрения следует учитывать следующие факторы.

Время работы:

- оператор работает около 40 часов в неделю (без перекуров); сверхурочные работы требуют дополнительных расходов и имеют свои естественные границы;
- робот может работать 7 дней в неделю по 3 смены. С учетом 8 часов в неделю на ремонт и обслуживание имеем время работы промышленного робота – 160 часов ($24 \times 7 - 8 = 160$); таким образом, мы можем, в рекламных целях, утверждать, что робот заменит 4 рабочих-операторов на данном оборудовании.

Точность и повторяемость при выполнении операций роботом положительно влияют на качество выпускаемой продукции.

Экономия материалов, расходуемых роботом при выполнении технологических операций. Например, окраска изделий распылением краски. Здесь рабочий-оператор может совершать два вида ошибок:

- мало краски (снижение качества);
- много краски (снижение качества и перерасход краски).

Причем установлено, что человек психологически имеет склонность к перерасходу краски, то есть совершает наиболее серьезную из двух ошибок.

Экономия дополнительных расходов, необходимых для обеспечения операторов:

- оплата отпусков и больничных;
- расходы на обеспечение безопасности;
- содержание бытовых помещений (комнаты отдыха, столовые, туалеты и т. п.);
- оплата отопления и освещения.

Перепрограммируемость робота обеспечивает гибкость производства и ослабляет действие фактора морального старения оборудования и роботов.

Технические факторы (основные):

- несовместимость робота и оборудования (моральная и иная);
- несоответствие уровней надежности робота и оборудования (выше или ниже);
- недостаточная повторяемость движений;
- проблема ориентации заготовок;
- проблема нестабильности размеров и хрупкости заготовок;
- проблема взаимной блокировки робота и оборудования.

Эксплуатационные факторы:

- сопротивление внедрению роботов со стороны рабочих-операторов;
- остановка производства на время установки и отладки;
- невозможность использовать ручную работу, чтобы покрыть простои роботов;
- необходимость переобучения операторов;
- планирование обслуживания роботов и поставки запасных частей.

1.3. ОСНОВНЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Рассмотрение различных классификационных признаков позволяет изучать многообразную совокупность представителей промышленной робототехники.

По характеру выполняемых работ промышленные роботы могут быть разделены на следующие группы:

- технологические (производственные) роботы; в качестве производящих или обрабатывающих машин выполняют основные операции технологического процесса (гибка, сварка и т. д.);
- вспомогательные (подъемно-транспортные) роботы; обслуживают основное технологическое оборудование (установка и снятие заготовок, деталей или инструмента, загрузка или разгрузка транспортеров, автоматизация транспортно-складских операций);
- универсальные роботы; сочетают в себе признаки производственных и вспомогательных роботов.

По степени специализации промышленные роботы делят на следующие виды:

- специальные роботы; выполняют определенные технологические операции или обслуживают конкретную модель основного технологического оборудования;
- целевые (специализированные) роботы; выполняют технологические операции одного вида или обслуживают основное технологическое оборудование, объединенное общностью манипуляционных действий;
- многоцелевые роботы; выполняют различные основные и вспомогательные операции, в том числе требующие разнотипных приемов действия.

По основным системам координатных перемещений. В данном случае классификационный признак формируется по виду рабочей зоны робота, в которой осуществляются основные координатные перемещения, и по типу координатной системы, в которой формируется движение схвата.

Рабочая зона – это пространство, в котором при работе может находиться рабочий орган манипулятора.

Основные координатные перемещения – все движения манипулятора и дополнительные перемещения основания робота без учета движений привода схвата, обеспечивающих зажим и освобождение объекта манипулирования. Движения манипулятора можно разделить на следующие типы:

- *транспортирующие движения*, которые обеспечивают перемещение центра схвата в заданную точку рабочей зоны;
- *ориентирующие движения*, которые обеспечивают ориентацию схвата в заданной точке относительно рабочей зоны.

Классификацию промышленных роботов по основным системам координатных перемещений можно представить графически (рис. 1.2).

Познакомимся с каждой из представленных в классификации координатных систем на примере типичных кинематических схем промышленных роботов.

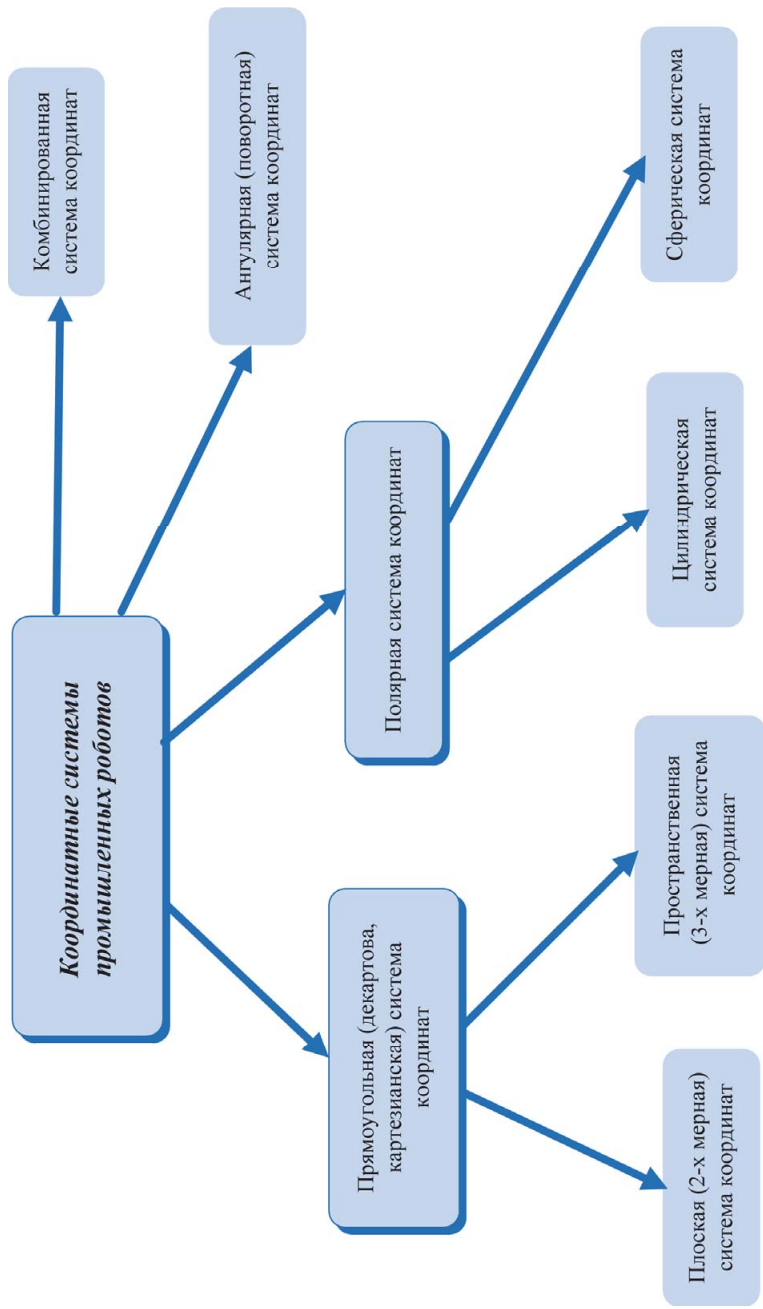


Рис. 1.2. Классификация промышленных роботов по координатным системам

Прямоугольная система координат. В этом случае объект манипулирования перемещается путем взаимных прямолинейных поступательных движений звеньев манипулятора по двум или трем взаимно перпендикулярным осям (рис. 1.3 – 1.6).

При этом звенья манипуляторов соединяются шарнирами линейных перемещений (S_i). Нумерацию звеньев и шарниров принято производить от неподвижного основания манипулятора. Последнее звено заканчивается схватом, конструкция которого зависит от функционального назначения промышленного робота.

Рабочая зона манипуляторов с прямоугольной системой координат (рис. 1.4, 1.6) имеет вид прямоугольника или параллелепипеда. Для таких манипуляторов естественными являются движения по линейным траекториям, их используют при сборке и складских операциях.

В робототехнике всегда стараются придерживаться известного принципа соответствия естественных движений, присущих механике, и вынужденных движений манипулятора, определяемых технологическим назначением робота [21].

Недостатком таких кинематических схем является невыгодное соотношение между объемом, занимаемым роботом, и объемом рабочей зоны.

Полярная система координат. Полярная система координат представлена в промышленной робототехнике двумя видами:

- цилиндрическая система координат (рис 1.7, 1.8), относящаяся к пространственным полярным системам координат; здесь присутствует один шарнир вращательного движения одного из звеньев (Θ_i);
- сферическая система координат (рис 1.9, 1.10), где схват перемещается в пространстве рабочей зоны с использованием вращательных движений звеньев манипулятора относительно двух перпендикулярных осей.

Рабочая зона манипуляторов с цилиндрической системой координат представляет собой цилиндры с вертикальной или горизонтальной ориентацией оси вращения. Схват манипулятора в равной степени легко осуществляет прямолинейные перемещения и вращение вокруг оси цилиндрической системы, это определяет широкое распространение в различных отраслях таких манипуляторов.

Для схвата манипулятора со сферической системой координат естественным представляется движение по сложным пространственным траекториям. Это в большей степени определяет обоснованность их применения в таких сложных технологических операциях, как сварка и покраска при изготовлении автомобильной, авиационной и иной сложной техники.

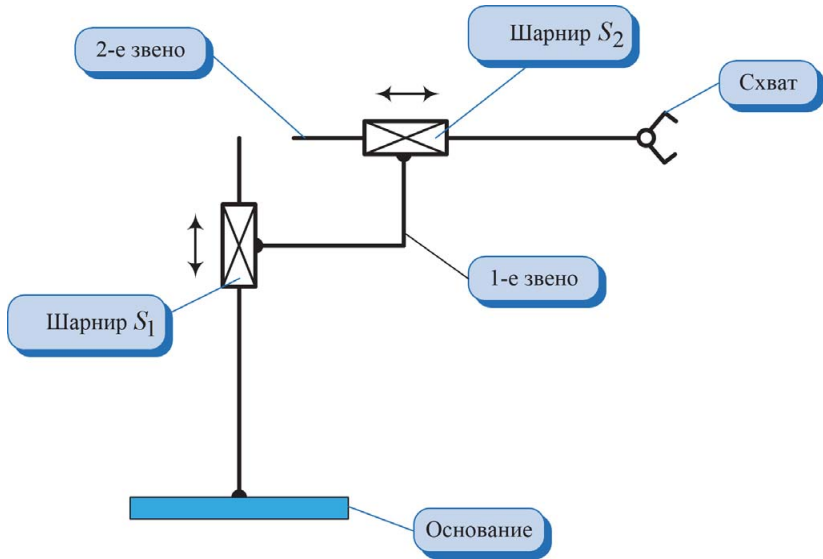


Рис. 1.3. Кинематическая схема манипулятора с плоской прямоугольной системой координат

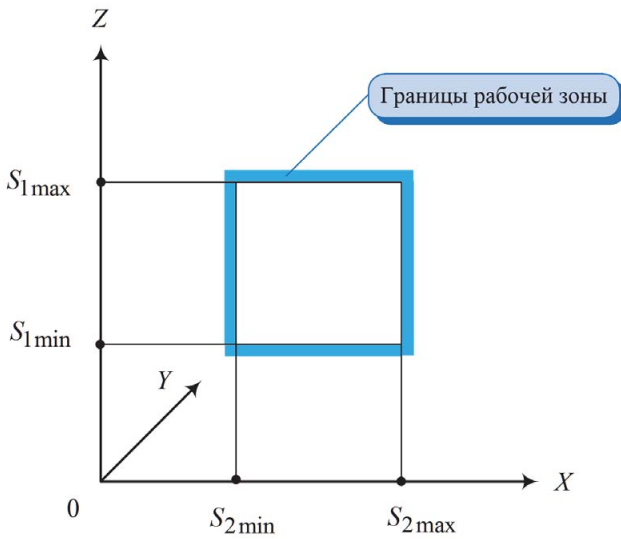


Рис. 1.4. Рабочая зона манипулятора с плоской прямоугольной системой координат

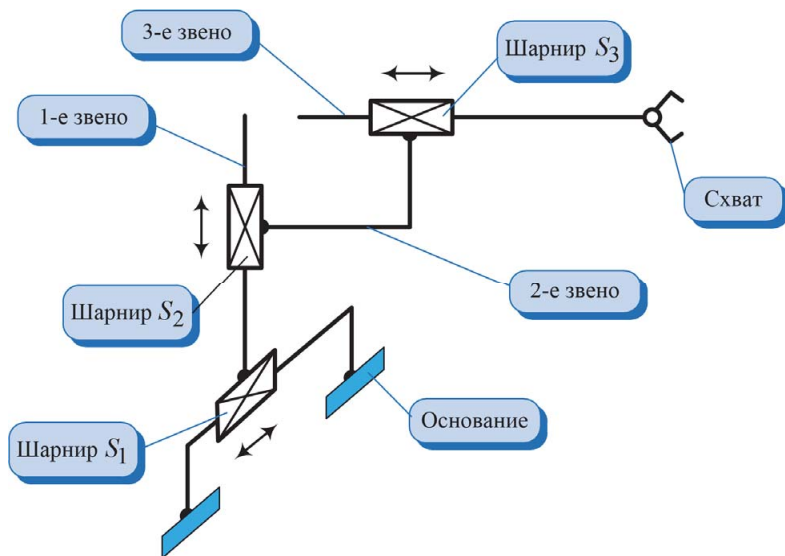


Рис. 1.5. Кинематическая схема манипулятора с пространственной прямоугольной системой координат

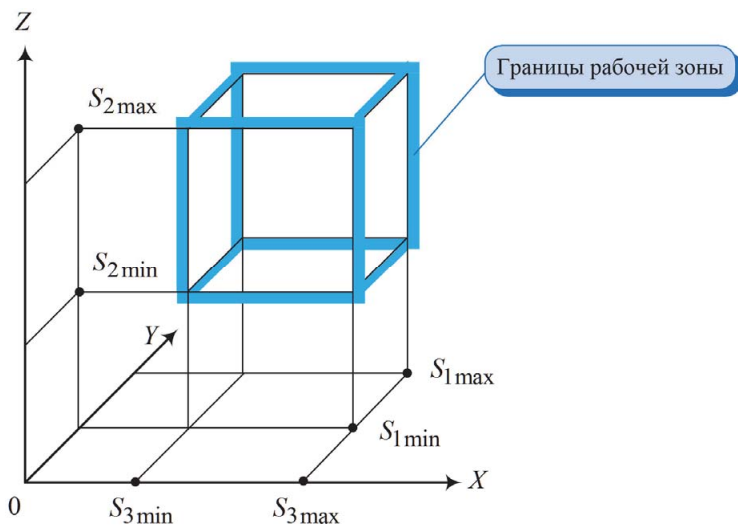


Рис. 1.6. Рабочая зона манипулятора с пространственной прямоугольной системой координат

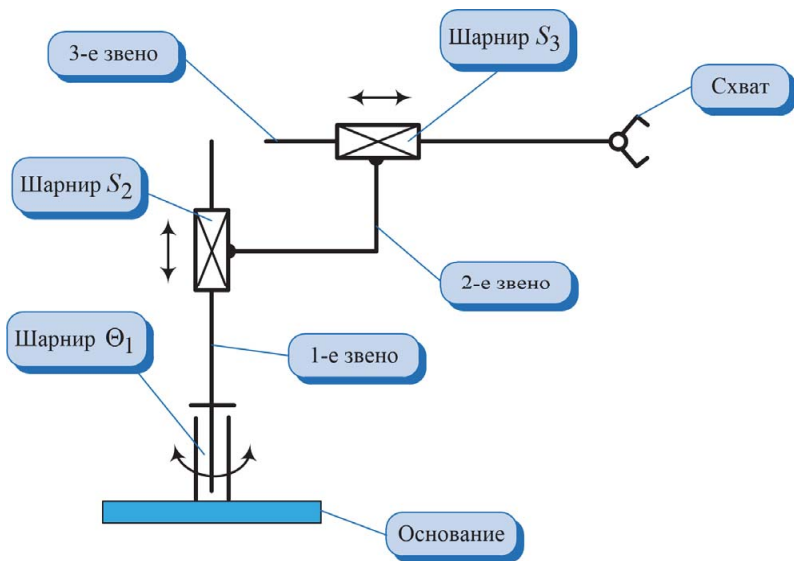


Рис. 1.7. Кинематическая схема манипулятора с цилиндрической системой координат

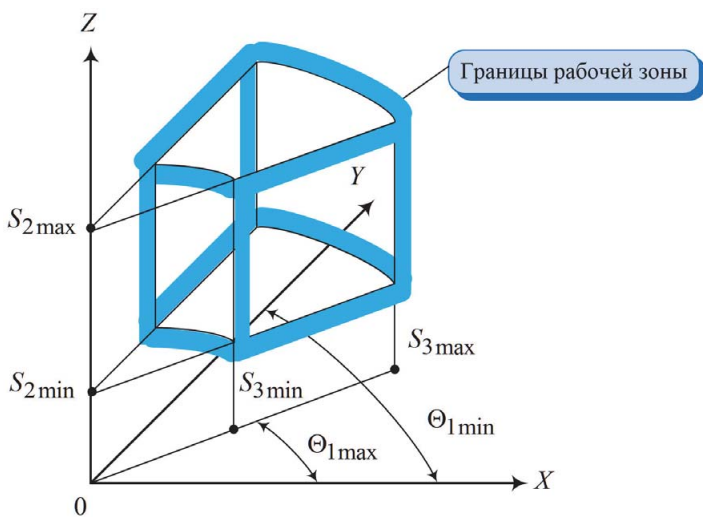


Рис. 1.8. Рабочая зона манипулятора с цилиндрической системой координат

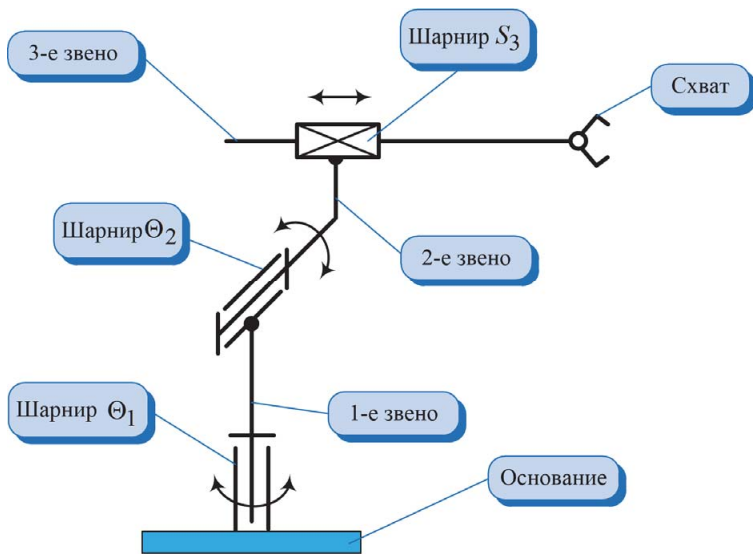


Рис. 1.9. Кинематическая схема манипулятора со сферической системой координат

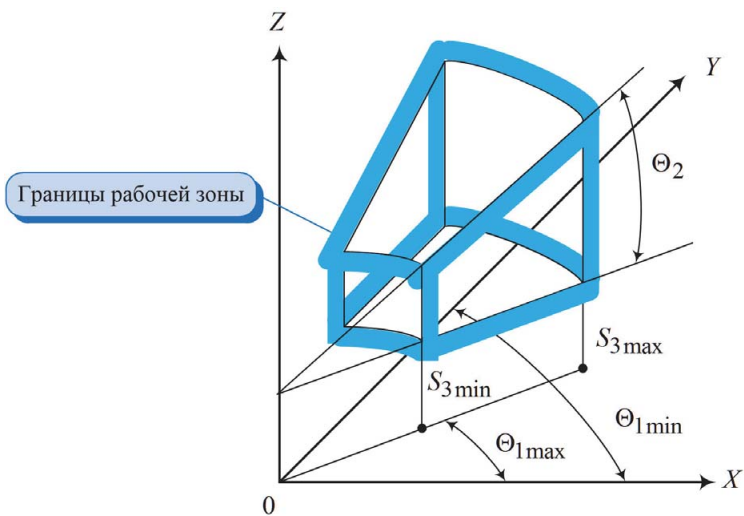


Рис. 1.10. Рабочая зона манипулятора со сферической системой координат

Ангулярная система координат. В плоской ангулярной системе координат (рис. 1.11) объект манипулирования перемещается в плоскости благодаря относительным поворотам звеньев манипулятора, имеющих постоянную длину. В этом случае появляется не только возможность обходить препятствия при движении схвата, но проблемы в управлении в связи с неоднозначностью конфигурации при позиционировании схвата. В промышленности применяют многозвенные манипуляторы с шарнирами вращения различной ориентации для выполнения технологических операций по обслуживанию внутренних полостей со сложной конфигурацией оборудования химической, нефтегазовой и атомной промышленности.

Комбинированная система координат. К манипуляторам с комбинированными системами координат относятся случаи, когда в одной кинематической схеме манипулятора присутствует сочетание нескольких из основных координатных систем.

На рис. 1.12 показана кинематическая схема манипулятора с комбинированной координатной системой. Сравнивая её с цилиндрической системой (рис. 1.7), видим, что манипулятор отличается заменой шарнира линейного перемещения S_3 шарниром вращательного перемещения Θ_3 . Такую координатную систему за рубежом называют двойной цилиндрической [17], также ее можно определить как ангулярно-цилиндрическую.

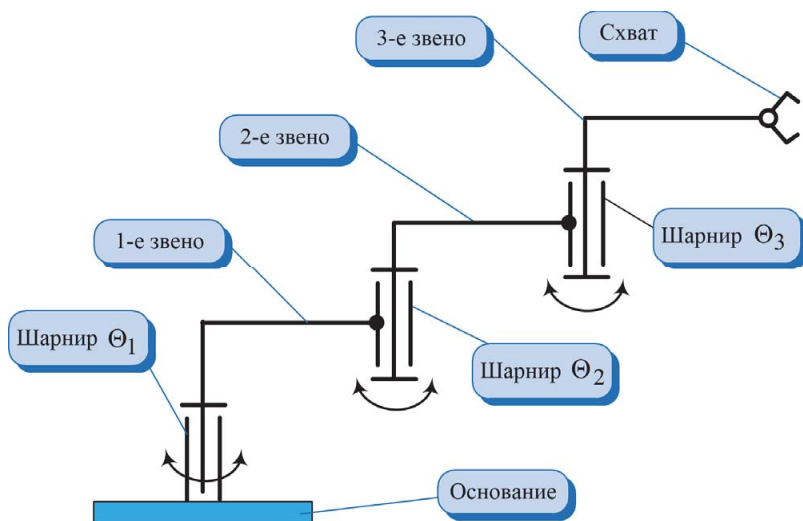


Рис. 1.11. Кинематическая схема манипулятора с ангулярной системой координат

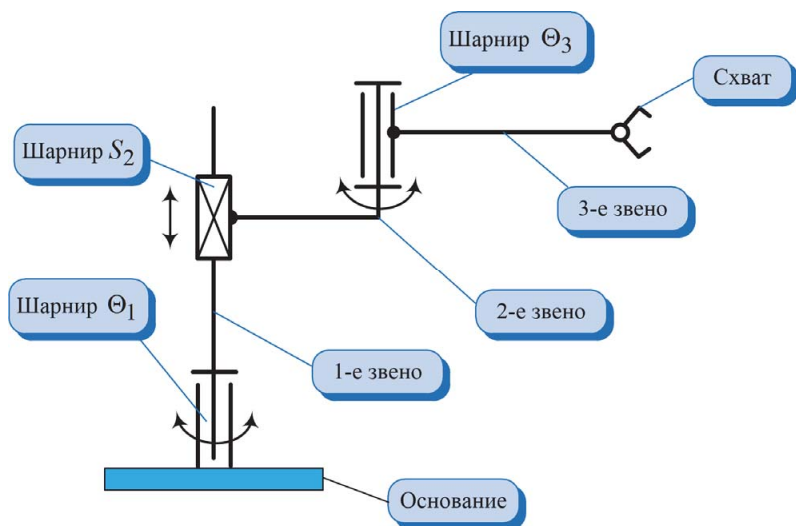


Рис. 1.12. Кинематическая схема манипулятора с комбинированной системой координат

Промышленные роботы классифицируют по числу степеней подвижности.

Число степеней подвижности – это количество возможных независимых движений объекта манипулирования относительно неподвижного звена (основания) без учета движений, обеспечивающих зажим объекта схватом робота.

Число степеней подвижности для манипулятора робота как совокупности некоторого числа подвижных звеньев определяется по формуле Сомова – Малышева [21]

$$W_1^* = p_5 + 2p_4 + 3p_3 + \dots, \quad (1.1)$$

где p_5 – количество кинематических пар 5-го класса (рис. 1.13, 1.14);

p_4 – количество кинематических пар 4-го класса (рис. 1.15);

p_3 – количество кинематических пар 3-го класса (рис. 1.16);

пары 2-го и 1-го классов не рассматриваем, так как они в промышленной робототехнике практически не применяются.

В большинстве кинематических цепей промышленных роботов применяют кинематические пары 5-го класса: вращательные или поступательные, обеспечивающие одну степень свободы в относительном движении каждого из двух последовательно соединенных звеньев.

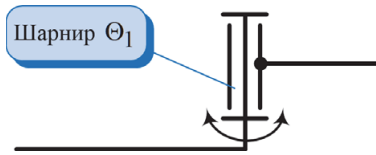


Рис. 1.13. Схема кинематической пары 5-го класса в соединении звеньев шарниром вращательного движения

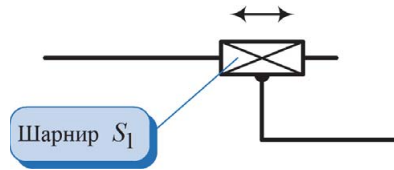


Рис. 1.14. Схема кинематической пары 5-го класса в соединении звеньев шарниром поступательного движения

Значительно реже применяют кинематические пары 4-го и 3-го классов (рис. 1.15, 1.16), обеспечивающие соответственно две и три степени свободы двух последовательно соединенных звеньев.

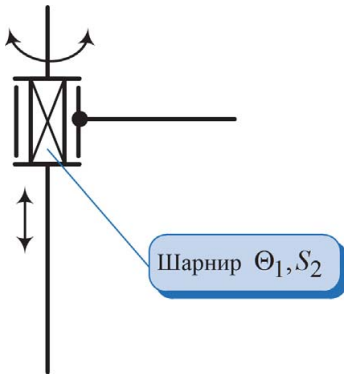


Рис. 1.15. Схема кинематической пары 4-го класса в соединении звеньев шарниром с сочетанием вращательного и поступательного движения

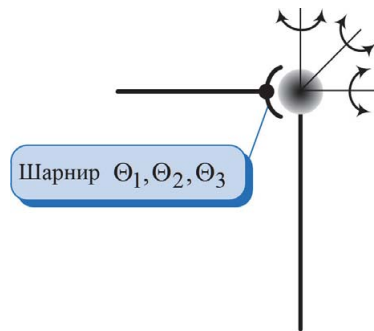


Рис. 1.16. Схема кинематической пары 3-го класса в соединении звеньев шарниром с сочетанием вращательного движения по трем взаимно перпендикулярным осям

Для работы с произвольно ориентированными объектами манипулирования необходимо иметь не менее 6 степеней подвижности:

- три транспортирующих степени для перемещения схвата в заданную точку;
- три ориентирующих степени для ориентации схвата в заданной точке.

Увеличение степеней подвижности (более чем 6 степеней) в робототехнике необходимо для повышения маневренности манипулятора, обхода

препятствий и т. п. Но это приводит к усложнению конструкции и неоднозначности расчета траектории движения. Для сравнения, у человека каждая рука имеет 27 степеней подвижности.

По мобильности промышленные роботы делят на следующие типы:

- стационарные;
- передвижные.

По конструктивному исполнению промышленные роботы можно разделить на категории:

- роботы, встроенные в технологическое оборудование;
- напольные роботы;
- подвесные роботы.

По типу силового привода промышленные роботы делятся:

- пневматические;
- электромеханические;
- гидравлические.

По схеме расположения приводов промышленные роботы можно разделить на следующие группы:

- роботы с расположением приводов в едином блоке;
- роботы с приводами, встроенными в шарниры;
- комбинированные.

Многообразии способов и систем управления роботов позволяет группировать их по различным признакам (вид траекторий, показатели качества управления, элементная база и др.).

К наиболее общим признакам относится *способ управления*, определяемый в зависимости от степени участия оператора в управлении роботом. По этому признаку роботы делят на две большие группы:

- автоматизированные (биотехнические) – оператор находится (участвует) в контуре управления;
- автоматические – оператор вне контура управления, его взаимодействие с роботом заключается только в процессе обучения.

Рассмотрим основные группы биотехнических систем управления (рис. 1.17).

Мускульные системы управления. Здесь оператор управляет манипулятором только с помощью собственной мускульной энергии.

Сбалансированные промышленные роботы. Содержат в кинематической схеме манипулятора систему противовесов, уравнивающих рабочий орган для экономии мускульной энергии оператора.

Экзоскелеты (киборги). Это многозвенные механизмы, звенья которых соединены с оператором (скелетом). В аналогах человеческих суставов расположены силовые приводы, движения оператора формируют лишь задания на движение манипулятора [19].

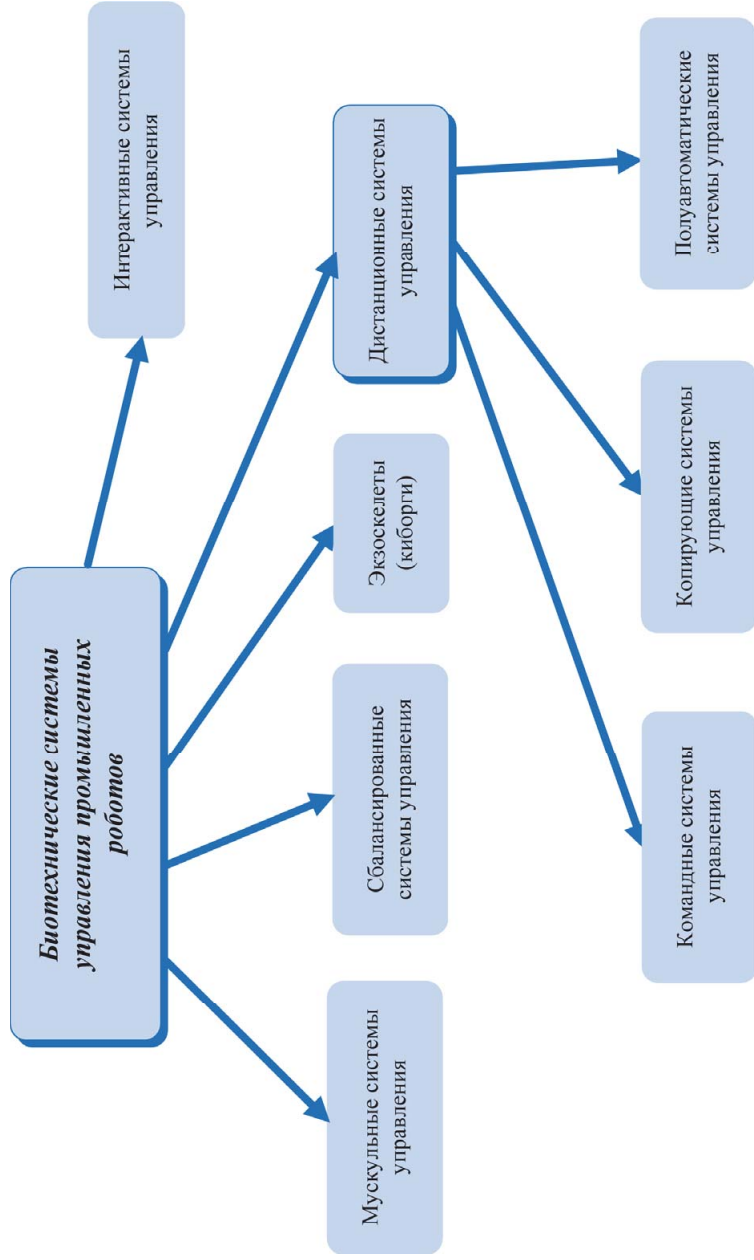


Рис. 1.17. Классификация биотехнических систем управления промышленных роботов