

ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. РОБОТЫ И МАНИПУЛЯТОРЫ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

**Учебно-методическое пособие
по одноименной дисциплине для студентов специальности
1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса»
заочной формы обучения**

Минск БГТУ 2006

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. РОБОТЫ И МАНИПУЛЯТОРЫ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

**Учебно-методическое пособие
по одноименной дисциплине для студентов специальности
1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса»
заочной формы обучения**

Минск 2006

УДК 621.865.8(075.8)
ББК 32.816я73
Т 65

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета

Составитель *А. С. Кравченко*

Рецензенты:

начальник отдела электронной техники
СКБ ЭТ НТЦ «Белмикросистемы» РУП ЗПП НПО «Интеграл»
кандидат физико-математических наук *В. В. Власов*;
зав. кафедрой инженерной графики БГТУ
кандидат технических наук, доцент *Н. И. Жарков*;
старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники кандидат технических наук *Д. А. Гринюк*

Транспортное оборудование. Роботы и манипуляторы
Г 65 **деревообрабатывающих производств** : учеб.-метод. пособие по одно-именной дисциплине для студентов специальности 1-36 05 01 «Ма-шины и оборудование лесного комплекса» заочной формы обучения / сост. А. С. Кравченко. – Минск : БГТУ, 2006. – 54 с.

ISBN 985-434-640-4.

В учебно-методическом пособии робот рассматривается преимущественно как единое изделие, как автоматическая машина определенного функционального назначения с определенными техническими характеристиками. Наряду с этим дается представление об отдельных устройствах промышленных роботов, об их использовании в производственных системах и о системах управления движением роботов и манипуляторов.

Предназначено для студентов специальности 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса» заочной формы обучения.

УДК 681.865.8(075.8)
ББК 32.816я73

ISBN 985-434-640-4

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2006

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Транспортное оборудование. Роботы и манипуляторы деревообрабатывающих производств» является одной из профильных при подготовке инженеров-механиков для деревообрабатывающих производств.

Цель дисциплины – изучение конструкций промышленных роботов и манипуляторов, специфики их компоновки и эксплуатации на деревообрабатывающих производствах.

Роботы – это системы, которые способны заменить человека в различных сферах деятельности благодаря своим способностям «думать» и «делать» (соотношение между «думать» и «делать» для разных роботов различно). Области применения роботов уже сегодня чрезвычайно разнообразны: начиная с медицинского обслуживания и заканчивая исследовательскими работами. В этом учебно-методическом пособии рассмотрены роботы, которые используются в машиностроении, приборостроении и деревообработке.

Роботы нужны для замены человека в его производственной деятельности, т. е. для выполнения различного рода основных и вспомогательных технологических операций.

Рассмотрим, например, технологический процесс механической обработки какой-либо детали вручную. В принципе современные промышленные роботы вполне могут с помощью необходимого инструмента выполнить любые технологические операции. Но рационально ли это в производстве? В некоторых случаях, оказывается, нет. Уже созданы металлорежущие станки с числовым программным управлением (ЧПУ), которые в автоматическом режиме, без участия человека в процессе обработки могут решить эту и другие, гораздо более сложные задачи быстрее и с более высоким качеством, в том числе и такие, с которыми человек вручную уже не справится.

Очевидно, что ни один робот с таким станком конкурировать не сможет. Но это и не нужно. Механообрабатывающие станки с ЧПУ созданы для того, чтобы, снимая лишний материал с заготовки (припуск), получить деталь требуемой формы и размеров, т. е. для автоматизации процесса резания. Они универсальны, так как могут обрабатывать самые разнообразные детали, отличающиеся по форме, размерам, материалу и т. д. Но устанавливал эти детали на станок и снимал их до сих пор человек. Здесь получился в известном смысле

парадокс. То наиболее сложное, что определяло квалификацию рабочего, стоящего за универсальным токарным станком, т. е. сам процесс обработки детали, удалось автоматизировать с помощью ЧПУ, а вот простейшие задачи по установке детали в патрон станка, с которыми легко справляется любой ученик токаря, автоматизировать не удавалось (речь, конечно, не идет об автоматических линиях в массовом и крупносерийном производстве, на которых обрабатывается одна и та же деталь; там эти операции выполняют, например, автооператоры). Вызвано это разнообразием форм, размеров, траекторий перемещения деталей и относится, разумеется, не только к механообрабатывающему оборудованию.

Операции загрузки и выгрузки технологического оборудования – вспомогательные. Но сфера применимости роботов в производстве не ограничивается только ими. Например, в процессе нанесения клея необходимо, чтобы конец сопла с определенной скоростью перемещался относительно стыка свариваемых деталей. Если траектория перемещения несложная, например прямолинейная, то этот процесс удается автоматизировать. Но чаще всего склеиваемые детали имеют сложную форму и, следовательно, непростую конфигурацию стыка, поэтому такой большой объем работ выполнялся вручную. Роботы же вполне успешно заменяют на этих процессах человека. То же самое можно сказать и об окраске распылением с помощью краскопультов (существуют и другие методы окраски, в частности окунанием, но мы на них останавливаться не будем). Детали простой формы, например панели, окрашиваются с помощью окрасочных конвейеров, по которым предметы двигаются с постоянной скоростью мимо краскопультов. Для деталей более сложной формы этот метод непригоден, так как равномерность окраски возможна лишь в том случае, когда расстояние от краскопульта до окрашиваемой поверхности и скорость перемещения постоянны. Если деталь имеет форму шкафа или каркаса, который к тому же нужно покрасить и изнутри? Роботы способны успешно решать и эти проблемы.

Общее в технологических процессах загрузки деталей, склеивания, окраски, позволяющее говорить о возможности и необходимости применения для их выполнения именно роботов состоит в том, что во всех случаях следует обеспечить перемещение детали относительно какого-либо рабочего инструмента по достаточно сложной траектории (в принципе

неважно, перемещает ли робот деталь относительно оборудования, как при загрузке, или сварочную головку, как при сварке). Сложность траектории, которую может обеспечить робот, достигается за счет усложнения кинематики исполнительных органов.

Таким образом, назначение промышленных роботов – перемещение детали в пространстве, или рабочего инструмента относительно детали, или деталей друг относительно друга (как, например, в сборке). Разумеется, при этом необходимо обеспечить выполнение определенных условий, соблюдение технологических режимов. Например, при сборке часто необходимо приложить усилие, чтобы осуществить сопряжение деталей.

Сложность технологических операций такого рода обусловлена двумя основными причинами: первая – разнообразие геометрических форм и размеров деталей и траекторий, по которым эти детали необходимо перемещать, и вторая, вытекающая из первой, – это большой объем информации, разнообразие и сложность задач ее переработки в процессе выполнения операций. Определим теперь, что же такое промышленный робот. Согласно государственному стандарту, промышленный робот – это «перепрограммируемая автоматическая машина, применяемая в производственном процессе для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям человека, при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки».

1. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Роль и значение промышленных роботов в решении вопросов автоматизации производств. Основные понятия и определения, классификация промышленных роботов. Основные показатели экономической целесообразности применения промышленных роботов в производственных системах.

Раздел 1. Конструкции промышленных роботов

Напольные промышленные роботы с горизонтальной выдвижной рукой и консольно размещенным механизмом подъема. Напольные промышленные роботы с горизонтальной выдвижной рукой, установленной на подъемной каретке. Напольные промышленные роботы с шарнирной рукой. Напольные промышленные роботы с многозвенной рукой. Портальные подвесные промышленные роботы. Промышленные роботы мостового типа. Модульные промышленные роботы с электро- и пневмоприводами, конструктивные особенности модулей.

Классификация агрегатно-модульных конструкций промышленных роботов. Определение параметров промышленных роботов.

Раздел 2. Основные показатели промышленных роботов

Параметры рабочей зоны, основные параметры робота и перемещение по степеням подвижности. Определение суммарной погрешности позиционирования и погрешность позиционирования по степеням подвижности промышленных роботов. Определение погрешности позиционирования робота, обслуживающего станки. Типовые схемы базирования деталей. Определение средних и максимальных скоростей и ускорений звеньев роботов и манипуляторов.

Раздел 3. Расчет и проектирование механизмов промышленных роботов

Винтовая передача качения, винтовая передача скольжения, несоосная винтовая передача, дифференциальная винтовая передача,

интегральная винтовая передача, реечная передача, тросовая передача, передача зубчатым ремнем – устройство и принцип действия, кинематический расчет, силовые соотношения, расчет ошибки положения.

Раздел 4. Применение промышленных роботов в отрасли

Требования к позиционированию, ориентированию и базированию обрабатываемого материала и заготовок. Выбор компоновки промышленного робота по условиям точности и быстродействия.

Раздел 5. Транспортное оборудование

Принципы построения графика маршрутного технологического процесса. Модель функционирования производственной системы. Оборудование для межоперационного перемещения заготовок и изделий. Схемы базирования заготовок и изделий. Манипуляторы поштучной подачи и ориентирования заготовок. Системы автоматизированного управления перемещением заготовок и изделий. Эксплуатация транспортного оборудования в условиях автоматизированных производств. Правила техники безопасности при эксплуатации и обслуживании транспортного оборудования, роботов и манипуляторов деревообрабатывающих производств.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Приведем основные технические характеристики робота, позволяющие судить о его возможностях. *Номинальная грузоподъемность* промышленного робота определяет максимальную массу предметов производства, которой он может манипулировать. При этом должны обеспечиваться не только захватывание и удерживание, но и установленные значения других эксплуатационных характеристик. По грузоподъемности роботы делятся на группы: от сверхлегких, предназначенных для работы с деталями массой до 1 кг, до сверхтяжелых, поднимающих предметы производства массой более 1000 кг.

Другой важнейшей характеристикой является *точность*, с которой робот может переместить деталь или инструмент в заданное положение в пространстве. Она называется погрешностью позиционирования рабочего органа манипулятора и характеризует отклонение положения рабочего органа манипулятора промышленного робота от заданного при его программировании. Допустимая ее величина зависит от того, для каких операций применяется робот. Если он окрашивает краскопульт деталь, то погрешность позиционирования в несколько миллиметров практически не влияет на качество изделия. Однако в некоторых технологических операциях такая погрешность не удовлетворяет технологическим ограничениям. Допустим, погрешность позиционирования не должна превышать десятых долей миллиметра; при сборке часов вообще нужна микронная точность.

Важной характеристикой является геометрическая характеристика рабочей зоны промышленного робота.

Рабочей зоной называется пространство, в котором может находиться рабочий орган манипулятора; другими словами, это совокупность всех точек, в которые может быть перемещен рабочий орган. В зависимости от конструкции промышленного робота рабочая зона может иметь различную форму, например прямоугольную. Рабочая зона характеризуется линейными или угловыми размерами, площадью сечения, объемом.

Понятием рабочей зоны в недостаточной степени характеризуются технологические возможности робота. Например, сборочный робот типа «Скилам» имеет рабочую зону, показанную на рис. 1, б. Но может ли он выполнить в пределах рабочей зоны любую

сборочную операцию? Оказывается, нет. «Скилам» способен осуществлять такие сборочные операции, в которых рабочее движение по реализации сопряжения осуществляется только вертикально сверху вниз. Перемещение под углом конструкцией не предусмотрено. У него недостаточно «гибкая» рука, поэтому он не может перемещать детали в пространстве по произвольной траектории. Эти возможности зависят от числа степеней подвижности промышленного робота.

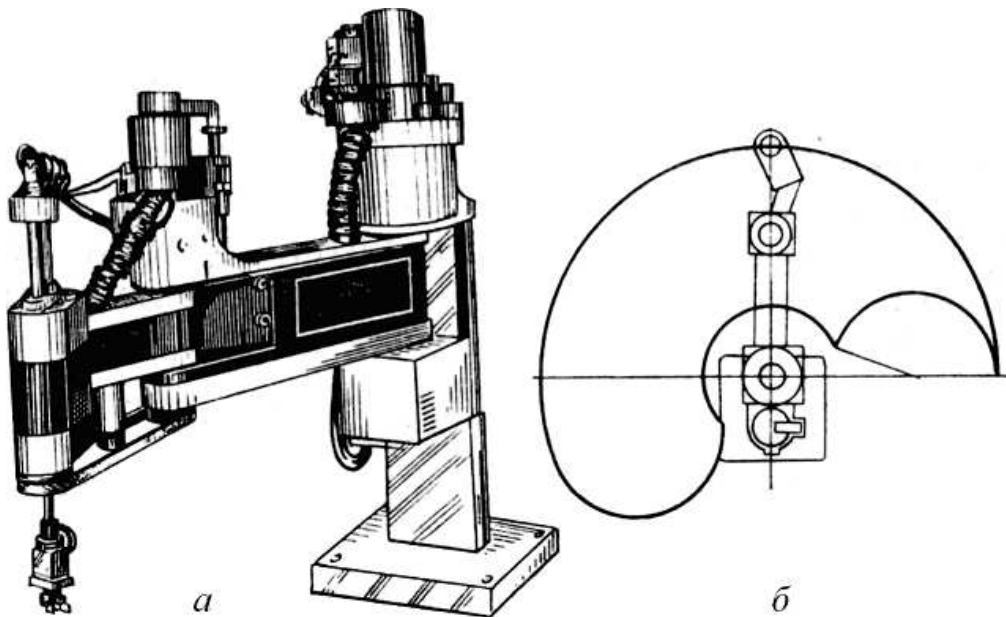


Рис. 1. Специализированный сборочный робот «Скилам» (Япония) (а) и конфигурация его рабочей зоны (б)

Под *числом степеней подвижности* понимается число степеней свободы кинематической цепи манипулятора. На практике оно равно числу кинематических пар, вращательных и поступательных. Из курса аналитической геометрии известно, что, для того чтобы осуществить любое движение твердого тела в трехмерном пространстве, достаточно трех поступательных и трех вращательных движений.

От понятия рабочей зоны отличается понятие *рабочего пространства* – пространства, в котором может находиться исполнительное устройство промышленного робота.

Различают стационарные и подвижные роботы. *Стационарные* предназначены для работы на одной рабочей позиции. *Подвижные роботы* обслуживают несколько позиций. К ним относятся, например,

роботы портального типа, такие как М-33 (рис. 2), которые могут перемещаться по монорельсу и обслуживать несколько токарных станков, а также транспортные роботы, обеспечивающие транспортировку заготовок и деталей со склада на станки и обратно, передачу деталей от станка к станку.

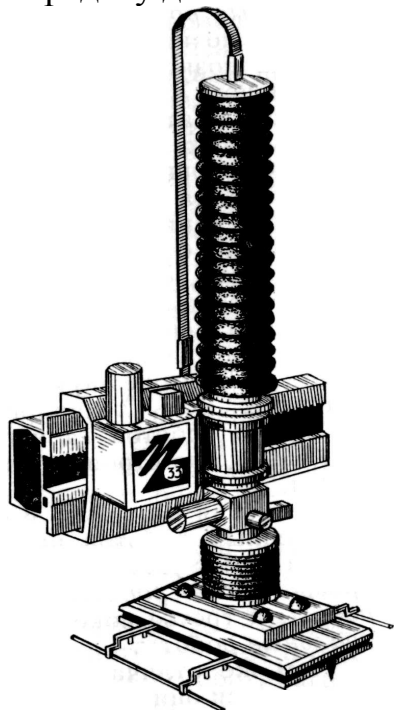


Рис. 2. Промышленный робот портального типа М-33 (СССР)

Говоря об эксплуатационных характеристиках промышленных роботов, нельзя не упомянуть об их *надежности*. Чем шире функциональные возможности, тем менее надежен робот вследствие его большей сложности. Надежность роботов оценивается наработкой на отказ. Ее повышение имеет большое значение, так как технологическую линию обслуживают несколько роботов (иногда несколько десятков) и при выходе из строя любого из них останавливается вся линия.

Несмотря на то, что с момента создания первых промышленных роботов прошло совсем немного времени, насчитывают уже три их поколения. Первое – *программные роботы*, второе – *адаптивные роботы* и третье – так называемые *интеллектуальные роботы*. Отличаются они многим, но основное отличие заключается в гибкости, способности перестраиваться, изменять свое поведение при изменении производственной среды. Эту гибкость (конечно, в пределах функциональных возможностей, зависящих от кинематики робота) определяют главным образом информация о внешней среде, которую может воспринять робот, и способность ее обработки системой управления робота, отвечающей за работу исполнительных механизмов. Однако не следует думать, что одно поколение роботов последовательно вытесняет другое. При их использовании необходимо придерживаться принципа минимальной функциональной избыточности, т. е. в зависимости от характера технологической задачи, которую должен выполнять робот, следует выбирать уровень его функциональной избыточности.

Во введении уже говорилось об истории робототехники. Предшественниками промышленных роботов были жестковстроенные манипуляторы (автооператоры). Их иногда называют роботами нулевого поколения и успешно применяют и сейчас в автоматических линиях, создаваемых в массовом и крупносерийном производстве для изготовления одной и той же детали в больших количествах в течение длительного промежутка времени (несколько лет). Автооператоры работают в одном цикле со всем остальным технологическим оборудованием линии и выполняют вспомогательные операции его загрузки и выгрузки. Так как деталь всегда одна и та же, то не возникает необходимости в перестройке автооператора.

Роботы первого поколения – программные – отличаются тем, что поведение их может меняться в результате смены программы. Рассмотрим, например, робот с ЧПУ, загружающий детали в патрон токарного станка с палеты (приспособление для транспортировки деталей, в котором они хранятся строго ориентированно в специальных гнездах). Робот берет поочередно заготовки из палеты и устанавливает их в патрон станка, а готовые детали – в освободившиеся гнезда. После того как обработка всех деталей в палете закончена, может быть подана палета с другими деталями. Тогда в станок с ЧПУ необходимо ввести управляющую программу для обработки новой детали. Новая программа вводится и в систему управления робота. Таким образом робот перестраивается на загрузку других деталей, при этом он работает в строго детерминированной среде.

Вся информация об изменении производственной среды поступает в систему управления робота в процессе его программирования, то, что поступает в процессе функционирования, крайне незначительно. Не оснащенный специальным датчиком робот, если в каком-либо гнезде палеты не окажется детали, будет пытаться «взять» пустое место и установить его в патрон. Если же конструкцией предусмотрены тактильные датчики, позволяющие обнаружить отсутствие детали, он остановится и вызовет человека, который должен выяснить и устранить причины остановки. Перестроиться на новую программу, приспособиться к происшедшим изменениям без помощи человека программный робот не может.

Информация о незапланированных изменениях производственной среды, поступающая в систему управления робота, способна вызвать реакцию только одного типа – прекращение его

функционирования и вызов обслуживающего персонала. Вместе с тем благодаря своей способности быстро перестраиваться на выполнение новых задач, программные роботы нашли широкое применение в различных областях промышленности и именно они составляют сейчас используемое большинство.

Роботы второго поколения – адаптивные – способны реагировать на изменение внешней среды. Какого рода изменения внешней среды здесь имеются в виду? Производство не всегда удается организовать таким образом, что роботу достаточно выполнять заданную программу, обеспечивающую его надежное функционирование. Рассмотрим, например, технологический процесс дуговой сварки. Предположим, нужно приварить боковую стенку к крыше кабины трактора «Беларусь». Свариваемые детали имеют сложную форму, стык – сложную конфигурацию. Теоретически робот, снабженный сварочной головкой, должен переместить ее по соответствующей траектории, и это перемещение может быть запрограммировано. На практике, когда операцию сварки выполняет программный робот, вместо годной продукции часто получается брак. Вызвано это тем, что детали, как уже говорилось, имеют сложную форму, значительные габариты, а требования к точности их изготовления не очень высоки, так как на эксплуатационные характеристики кабины незначительные отклонения размеров существенного влияния не оказывают. При транспортировке детали из листового металла могли слегка деформироваться, длина же стыка довольно значительна. В итоге робот где-то положит шов хорошо, где-то – лишь на одну из свариваемых деталей, а где-то и вовсе «варит воздух».

Адаптивный же сварочный робот, выполняя эту операцию с помощью средств осязания, которыми он оснащен, постоянно контролирует положение электрода относительно стыка деталей. Информация о смещении поступает в систему управления робота, которая ее обрабатывает в реальном масштабе времени, формирует управляющие воздействия и передает их исполнительным органам, корректирующим траекторию движения.

Таким образом, адаптивные роботы оборудованы развитой системой восприятия информации о внешней среде в процессе функционирования, которой программные роботы не имеют. Эта информация должна быть не только воспринята, но и преобразована в управляющую, поэтому адаптивные роботы имеют еще и систему

обработки информации. Так как именно ЭВМ является универсальной машиной для обработки информации, системы управления адаптивных роботов создаются на базе достаточно мощных вычислительных программ на основе микропроцессорной техники. Безусловно, реакция робота на изменения внешней среды должна быть вполне определенной. Алгоритмы переработки информации об изменениях внешней среды в управляющие воздействия программируются и составляют очень важную часть программного обеспечения. Совершенство программного обеспечения адаптивного робота делает возможным широту его функциональных возможностей, гарантирует эффективность в эксплуатации.

Роботы третьего поколения – интеллектуальные. Они наделены всеми способностями, что и роботы первого (программные) и второго (адаптивные) поколений. Интеллектуальные роботы, как и программные, способны действовать целенаправленно, выполнять жестко заданную программой последовательность операций. Как и адаптивные, они способны воспринимать информацию о внешней среде, обрабатывать ее и регулировать свое поведение в соответствии с изменениями внешней среды. Главное отличие интеллектуальных роботов состоит в том, что они могут планировать свою деятельность. Перед роботом третьего поколения достаточно поставить задачу: четко сформулировать цель, критерии, по которым он должен оценивать способы достижения цели, задать ограничения, в рамках которых он может действовать, самостоятельно разрабатывать множество способов, путей решения поставленной задачи, оценивать их с точки зрения заданных критериев, выбирать наилучший в конкретных условиях путь и решать задачу. Таким образом, основное, что отличает роботы различных поколений, – это объем и сложность задач переработки информации, возникающих в процессе их функционирования.

3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РОБОТА

Исполнительная система робота – это механизм, предназначенный для воспроизведения сложных пространственных движений с целью перемещения предметов производства и (или) инструмента и технологической оснастки по некоторой заданной траектории. Особый интерес вызывает кинематика исполнительных систем.

Исполнительная система робота представляет собой кинематическую цепь из звеньев, сочлененных друг с другом. Подвижное соединение звеньев называется кинематической парой. Различают поступательные и вращательные пары. Характер кинематической пары определяет возможные перемещения звеньев, составляющих кинематическую пару, друг относительно друга.

Ограничения на возможные относительные перемещения звеньев определяются с помощью понятия степени подвижности, имеющей большое значение в робототехнике. *Степенью подвижности*, или *степенью свободы*, механизма называется его способность совершать в пространстве перемещение либо вдоль одной из осей, либо вокруг одной из осей в прямоугольной системе координат.

Свободно расположенное тело имеет шесть степеней подвижности, т. е. оно может перемещаться вдоль любой из осей X , Y , Z (три степени подвижности), а также вращаться относительно каждой из этих осей (еще три степени подвижности) (рис. 3).

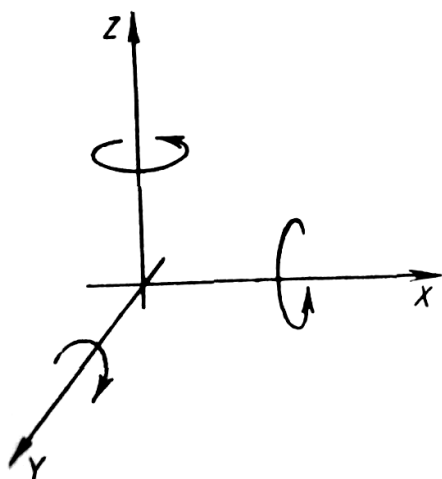


Рис. 3. Степени подвижности свободно расположенного в пространстве тела

В технике при проектировании механизмов, как правило, налагают определенные ограничения на подвижность их звеньев. Рассмотрим несколько случаев таких ограничений.

Шар лежит между двумя параллельными поверхностями (рис. 4, а). Он будет иметь уже не шесть степеней подвижности, а пять, поскольку перемещение вдоль оси Z ограничено плоскостями.

Шар, помещенный в трубу (рис. 4, б), имеет четыре степени подвижности. Нет возможности

свободно перемещаться вдоль осей Z и X .

Сферический шарнир (рис. 4, в) имеет три степени подвижности. Нет возможности перемещаться ни по одной из координат.

Цилиндрический шарнир (рис. 4, г) имеет две степени подвижности. Может лишь вращаться вокруг оси X и перемещаться вдоль нее.

Цилиндрический шарнир с ограничением перемещения вдоль оси X (рис. 4, д) имеет одну степень подвижности – только поворот вокруг оси X .

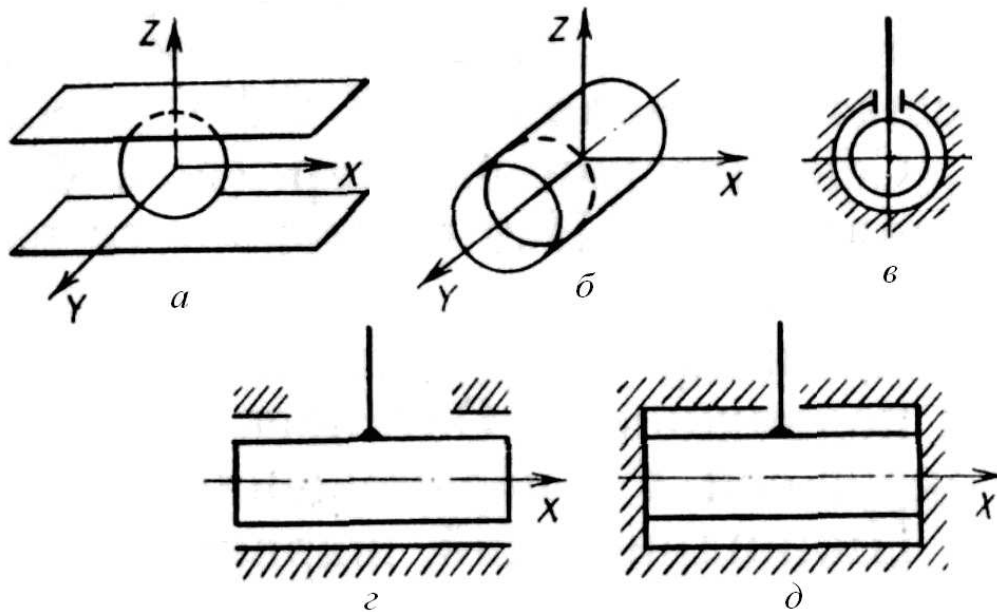


Рис. 4. Способы ограничения подвижности тела

Если механизм содержит несколько звеньев, шарнирно соединенных между собой, то суммарная степень его подвижности равна сумме степеней подвижности всех звеньев.

В исполнительной системе манипулятора в зависимости от назначения устройства, выполняющего перемещение, и его величины выделяют три типа степеней подвижности: *межпозиционная*, *переносная* и *ориентирующая*. В соответствии с этим и саму исполнительную систему подразделяют на три функционально отличающихся механизма: *устройство передвижения манипулятора*, *манипулятор* и *рабочий орган*.

Межпозиционные степени подвижности – это степени подвижности устройства передвижения манипулятора. С их помощью выполняются операции транспортировки деталей между рабочими позициями. Например, роботы портального типа, такие как М-33, могут обслуживать несколько станков, выполняя операции загрузки заготовок, снятия деталей, транспортировки их между станками. Последняя операция может выполняться благодаря тому, что робот М-33 имеет одну межоперационную степень подвижности: может перемещаться прямолинейно вдоль траверсы. Наличие межпозиционных степеней подвижности позволяет расширить рабочую зону до рабочего пространства. Движения, осуществляемые с помощью межпозиционных степеней

подвижности, называются *глобальными*. С их помощью перемещается сам манипулятор.

Переносные и ориентирующие степени подвижности реализуются кинематической цепью манипулятора. *Переносной* называется степень подвижности, используемая при перемещении рабочего органа. Эти движения называются также *региональными*. Таковы перемещения шпинделя обрабатывающего центра по траектории, заданной управляющей программой. Совокупность региональных перемещений образует рабочую зону манипулятора.

Рабочий орган, закрепленный на конечном звене манипулятора, в процессе его перемещения по заданной траектории при выполнении какой-либо технологической операции должен быть определенным образом сориентирован. Ориентация рабочего органа в пространстве обеспечивается с помощью ориентирующих степеней подвижности манипулятора. Ориентирующие движения называются также *локальными*.

Кинематические характеристики исполнительной части робота зависят от числа степеней подвижности, их вида и сочетания. Именно эти особенности кинематической схемы робота выражаются понятием *системы координат*, в которой он работает.

Как известно, положение точки в пространстве определяется тремя координатами, причем в различных системах координат ее координаты различны. В робототехнике различают четыре такие системы: *декартова (прямоугольная), цилиндрическая, полярная и угловая*. Разберем особенности каждой из них.

Предположим, что в пространстве задана точка N (рис. 5). Ее положение однозначно может быть определено тремя координатами – X_N, Y_N, Z_N . При перемещении этой точки в пространстве в положение N_1 изменятся и ее координаты: они станут равными $X_{N_1}, Y_{N_1}, Z_{N_1}$. Величины приращения (т. е. перемещения) по всем координатам составят: $\Delta X = X_{N_1} - X_N$; $\Delta Y = Y_{N_1} - Y_N$; $\Delta Z = Z_{N_1} - Z_N$.

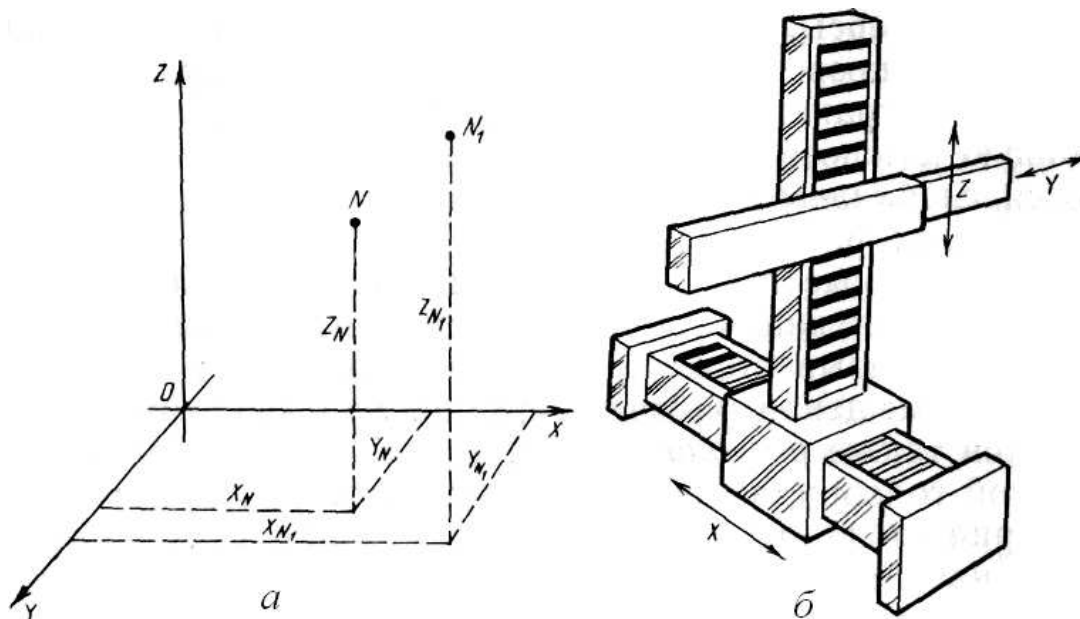


Рис. 5. Прямоугольная система координат (а) и структура робота, реализованного в этой системе (б)

Следовательно, задача перемещения в пространстве определенной точки, например конца схвата манипулятора, работающего в прямоугольной системе координат, сводится к перемещению ее по каждой координате в отдельности.

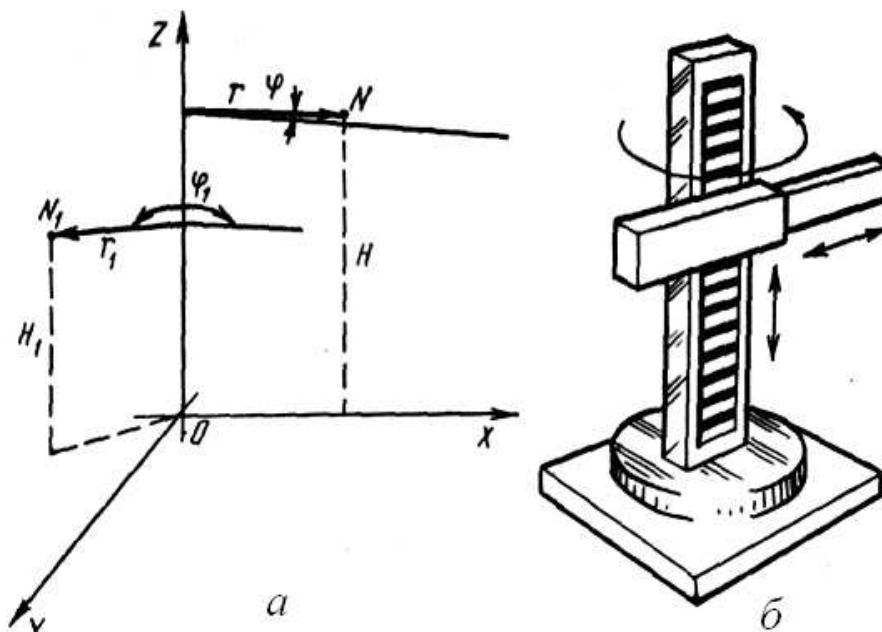


Рис. 6. Цилиндрическая система координат (а) и структура робота, реализованного в этой системе (б)

Положение точки в цилиндрической системе координат (рис. 6) также задается тремя величинами: радиусом, параллельным одной из плоскостей (на рисунке плоскости XOY) прямоугольной системы координат); высотой смещения H этого радиуса от параллельной ему (базовой) плоскости и углом поворота φ этого радиуса r относительно другой базовой плоскости отсчета (в данном случае ZOX).

Пусть за некоторое время точка N переместилась в положение N_1 . Тогда ее положение будут характеризовать новые значения параметров: r_{N_1} , H_{N_1} , φ_{N_1} ; их приращения: $\Delta r = r_{N_1} - r_N$; $\Delta H = H_{N_1} - H_N$; $\Delta \varphi = \varphi_{N_1} - \varphi_N$.

Если представить, что длина руки манипулятора соответствует величине радиуса r , то для достижения заданной точки в пространстве манипулятор должен поднять руку на высоту этой точки, выдвинуть на величину, равную радиусу r , и развернуть ее на угол φ .

В сферической (полярной) системе координат (рис. 7) положение точки в пространстве также задается тремя параметрами: радиусом, на котором точка N расположена относительно выбранного полюса ρ ; углами α и β наклона радиуса r относительно двух базовых взаимно перпендикулярных плоскостей K и M , причем полюс ρ принадлежит обеим плоскостям.

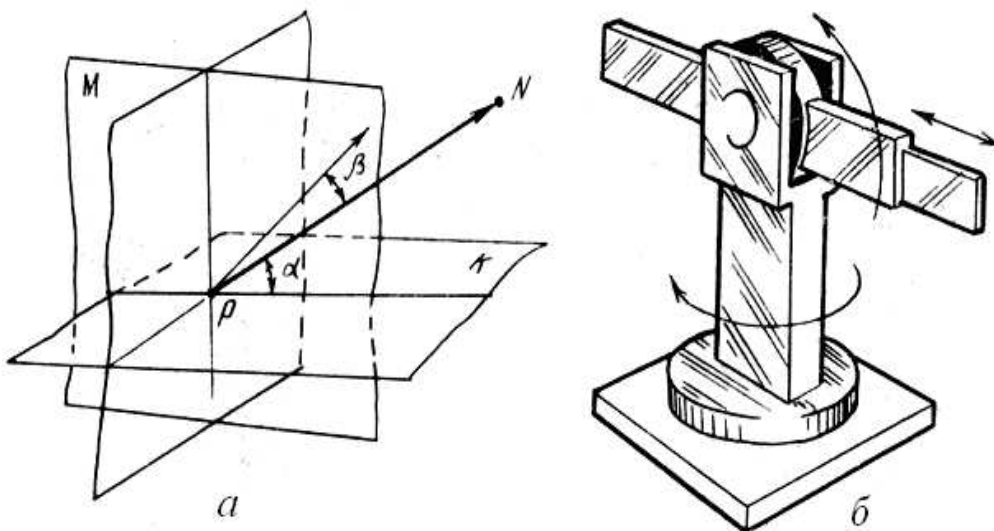


Рис. 7. Координаты точки в сферической системе координат (а) и структура робота, реализованного в этой системе (б)

Очевидно, что при изменении положения точки N в пространстве изменятся и все параметры, определяющие ее положение. Их приращения будут иметь вид

$$\Delta r = r_{N1} - r_N; \Delta \alpha = \alpha_{N1} - \alpha_N; \Delta \beta = \beta_{N1} - \beta_N.$$

Достаточно установить руку манипулятора, действующего в полярной системе координат, под углами α и β и выдвинуть ее на величину r , для того чтобы была достигнута нужная точка пространства.

В угловой системе координат (рис. 8) положение точки в пространстве задано тремя углами α , β , γ , причем углы β и γ лежат в одной плоскости. Тем самым при определенном соотношении длин звеньев может быть достигнута любая точка рабочей зоны. Перемещение же от точки к точке будет задано как изменение всех трех углов: $\Delta \alpha = \alpha_{N1} - \alpha_N$; $\Delta \beta = \beta_{N1} - \beta_N$; $\Delta \gamma = \gamma_{N1} - \gamma_N$;

Манипуляторы, действующие в угловой системе координат, называются еще *антропоморфными* (человекоподобными), так как они более всего напоминают руку человека.

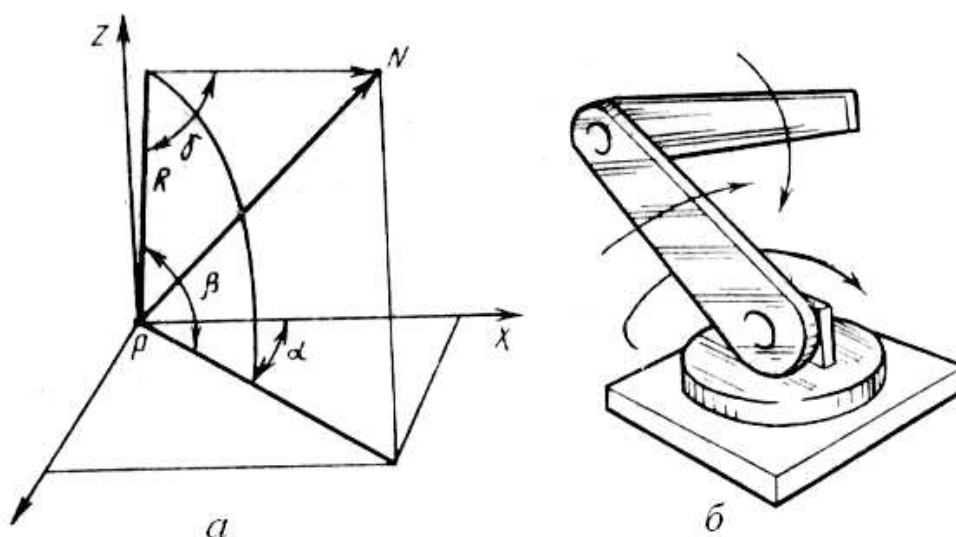


Рис. 8. Угловая система координат (а) и робот, работающий в угловой системе (б)

Рис. 5–8 и приведенные для различных систем координат зависимости показывают, каким образом рабочий орган, закрепленный на конечном звене манипулятора, может быть перемещен в любую точку в пределах рабочей зоны робота.

Сочетание трех поступательных пар позволяет получить структурную кинематическую схему робота, работающего в декартовой системе координат (см. рис. 5), двух поступательных и вращательной – в цилиндрической (см. рис. 6), поступательной и

двух вращательных – в сферической (см. рис. 7), трех вращательных – в угловой (см. рис. 8).

Известно, что произвольное движение тела в пространстве – результат сложения трех поступательных и трех вращательных движений. Поступательные движения здесь играют роль переносных, ориентация же обеспечивается с помощью вращательных движений. Причем, как мы уже убедились, вместо трех поступательных движений для перемещения рабочего органа могут быть использованы любые комбинации из трех движений: поступательных и (или) вращательных. Кинематическая схема робота определяет форму его рабочей зоны. Выбор конкретной кинематической схемы зависит от технологических задач, которые должен решать робот.

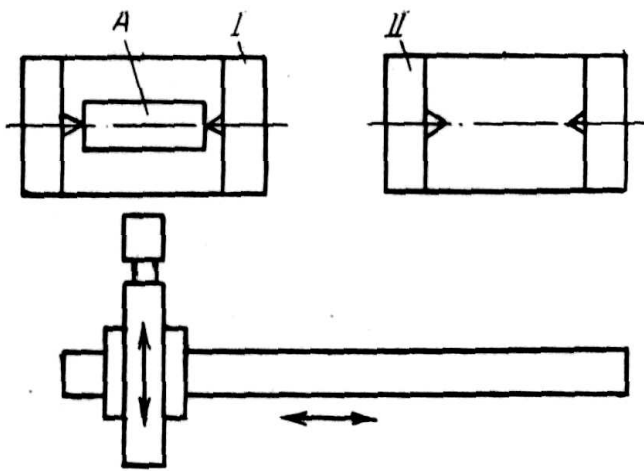


Рис. 9. Манипулятор портального типа, обслуживающий два токарных станка

Манипуляторы, работающие в прямоугольной системе координат, удобно использовать в тех случаях, когда при перемещении детали *A* не возникает необходимости в ее повороте, а достаточно поступательных перемещений, например манипулятор портального типа загрузки двух токарных станков (*I* и *II*),

расположенных так, как изображено на рис. 9.

На рис. 10 показана другая компоновка комплекса из тех же токарных станков и обслуживающего их робота. В этом случае более пригоден робот, работающий в цилиндрической системе координат.

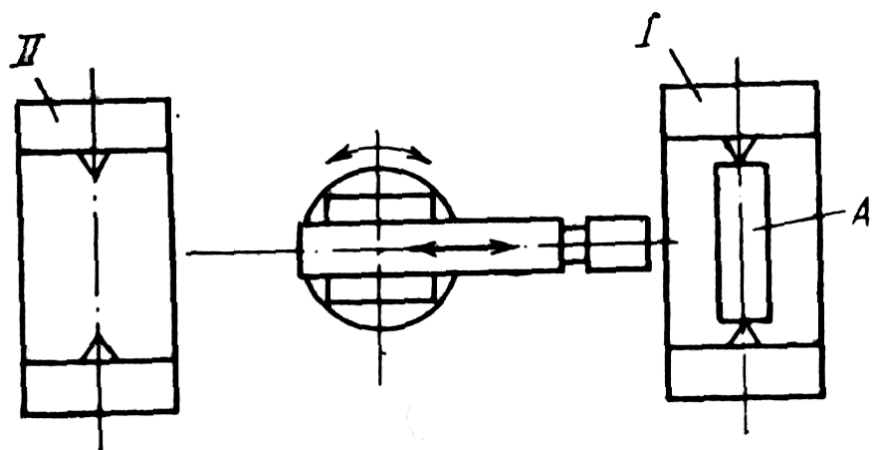


Рис. 10. Другая компоновка комплекса из двух станков, более удобная для робота, работающего в цилиндрических координатах

4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРА

Системы автоматического регулирования в роботах управляют движением звеньев манипулятора, осуществляющего пространственное перемещение исполнительного органа, сообщая ему необходимое усилие. Процесс пространственного перемещения может быть реализован двумя способами. При первом управление всеми движениями звеньев манипулятора обеспечивается одним центральным устройством. Подобная схема имеет один уровень иерархии. При втором, получившем более широкое распространение, управление осуществляется на двух уровнях иерархии, представляющих собой:

- рассредоточение управляющих устройств (движением каждой кинематической пары управляют отдельные (один или несколько) приводы);
- координацию действий устройств (управляющих движением различных кинематических пар), учитываемую в уравнениях состояний (обычно составляемых для многозвенного механизма с не полностью устраненными связями) в зависимости от подзадач, выполняемых различными системами робота (для решения общей задачи).

В данной главе рассматриваются системы автоматического регулирования для управления движением одной кинематической пары (изменяется лишь одна обобщенная координата). Здесь не обосновывается справедливость такого подхода в случае, когда различные обобщенные переменные связаны между собой в достаточной степени.

Рассмотрим несколько ситуаций.

Движение с управлением по положению. К нему можно отнести:

- движение от точки к точке, управление которым может выполняться двумя способами: а) с помощью следящей системы; б) без обратной связи, дискретно, путем переключения электрических цепей или других устройств;
- непрерывно контролируемое движение, когда траектория с требуемой точностью воспроизводится системой автоматического регулирования согласно установленному временному закону (контурное управление).

Движение с управлением по усилию. В данном случае положение исполнительного органа:

- определяется по величине испытываемого им противодействующего усилия, возникающего со стороны внешней среды;
- обеспечивается такой системой телеуправления, в которой человек-оператор осуществляет обратную связь по усилию (система регулирования двустороннего действия).

Дальнейшие рассуждения проводятся для систем с управлением вращательным движением. Полученные результаты могут быть обобщены и на системы с поступательным движением.

Рассмотрим управление сочленениями робота, прямо или косвенно связанными с двигателями, и составим уравнения движения, пользуясь следующими обозначениями: r – положение входного звена относительно выходного; v – скорость входного звена относительно выходного; C_m – движущий (вращающий) момент, передаваемый на ось сочленения по приводу; C_p – момент сил сопротивления по оси сочленения, обусловленный нагрузкой; J – приведенный момент инерции относительно оси сочленения.

Состояние (r, v) сочленения определяется уравнениями

$$dr/dt = v; J(dv/dt) = C_m - C_r. \quad (1)$$

Величина движущего момента определяется характеристиками выбранной системы управления, в то время как момент сил сопротивления обусловлен действием внешней среды и обычно включает слагаемое, учитывающее вязкое трение, которым часто можно пренебречь:

$$C_{r1} = F_1 v. \quad (2)$$

Слагаемое, описывающее влияние сухого трения, часто представляемое в виде

$$C_{r2} = C_s \text{sign}(v). \quad (3)$$

Слагаемое, обусловленное силами, действующими на расстоянии C_{r3} , и слагаемое, отражающее реакцию внешней среды на движение робота C_{r4} .

4.1. Движение от точки к точке. Импульсное управление

Функция системы обеспечения движения состоит в том, чтобы перевести сочленение из начального состояния $(r_0, 0)$ в конечное $(r_i, 0)$ за минимальное время T . Эта задача имеет смысл, лишь когда есть ограничения и известен момент сил сопротивления (постоянный или зависящий от одной из переменных t, r или v).

Движение при наличии ограничений на ускорение. При функционировании роботов в большинстве случаев ускорение ограничено, т. е.

$$dv/dt = a. \quad (4)$$

Оптимальное управление состоит в выполнении движения вначале с максимальным ускорением, а затем с максимальным торможением (рис. 11), происходящим за полное время

$$T = 2\sqrt{(r_i - r_0)/a}. \quad (5)$$

Данный закон движения получается путем соответствующего управления параметрами, определяющими величину движущего момента (силой тока в случае двигателей постоянного тока, давлением масла в случае гидроцилиндра и т. д.) с помощью простых органов управления (реле, электрические переключатели).

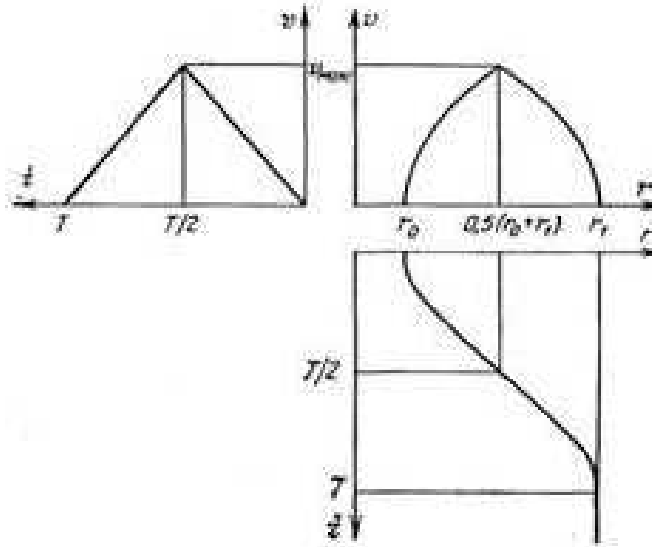


Рис. 11. Изменение скорости в системе с ограничением на ускорение

Управление с помощью коммутаций. Управление величиной движущего момента может осуществляться дискретно с помощью переключений электрических цепей или других устройств. В случае чисто инерционной нагрузки ($C_r = 0$) параметры в различных переключаемых цепях будут изменяться одинаково. Разумеется, это неверно, когда сухое трение в системе велико или существует постоянный момент противодействующих сил (рис. 12).

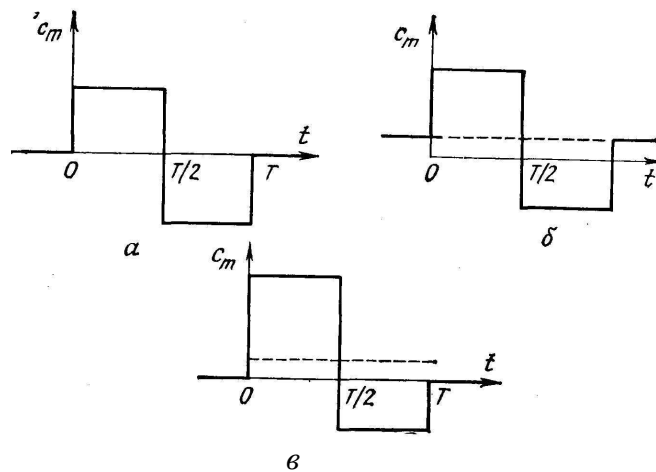


Рис. 12. Законы управления: *а* – при чисто инерционной нагрузке; *б* – при инерционной нагрузке с моментом сил сопротивления; *в* – при инерционной нагрузке с сухим трением

Условия проведения коммутаций. Значения движущего момента в точках, разделенных интервалами времени $t = T / 2$ или $t = T$, можно изменять при управлении различными способами: с использованием обратной связи или без нее.

Разомкнутый контур (без обратной связи). В данном случае значения моментов времени $T / 2$ и T можно получить по формуле (5) или на этапе обучения. Управление движением от точки r_0 до r_1 осуществляется с помощью временной программы. Если некоторые параметры (момент инерции нагрузки, трение и т. д.) известны недостаточно точно, возможно появление неконтролируемых ошибок при позиционировании.

Замкнутый контур (с обратной связью по положению). Изменение направления ускорения должно производиться в точках $r_1 = 0,5 (r_0 + r_1)$ и r_1 , в которых с помощью датчика положения можно изменять сигналы управления. Так как выбор точек r и r_1 не зависит от величины a , конечное состояние в этой системе малочувствительно к погрешностям в определении величины J . И наоборот, ошибки могут возникать, если фактические значения момента сил сопротивления отличаются от значений, по которым вычислялся движущий момент.

Примечание. Несмотря на то что эта структура управления содержит замкнутый контур, она не является классической системой автоматического релейного регулирования, так как в ней выработка команды управления производится по закону, который учитывает начальное состояние, момент нагрузки и не зависит от знака отклонения от рассматриваемого положения (рис. 13).

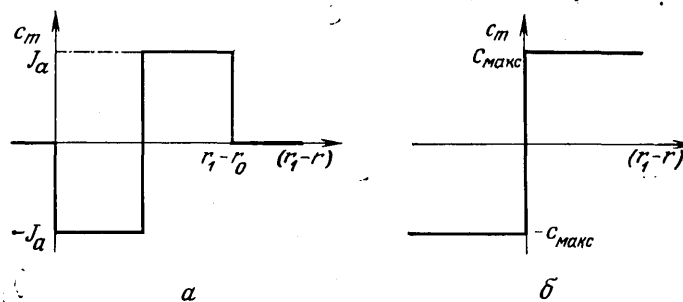


Рис. 13. Характеристики системы управления: *a* – импульсное управление; *б* – релейное управление

Замкнутый контур (с обратной связью по скорости). К рассмотренным выше способам управления можно отнести также

«тахометрический» способ, состоящий в изменении сигнала управления, когда угловая скорость достигает величины либо падает до нуля.

$$v_{\max} = 2\sqrt{a(r_1 - r_0)}. \quad (6)$$

Этот способ управления не требует применения дорогостоящих датчиков положения и может использоваться для приближенного определения скорости (по противо-э.д.с. в случае применения двигателя постоянного тока). Однако он имеет недостатки, которые проявляются в том случае, если работа системы происходит не в одних и тех же условиях.

Заключение. Прерывистое во времени, по положению или скорости управление может обеспечивать перемещение за минимальное время, но не гарантирует высокой точности позиционирования.

Достичь требуемой точности при действии различных возмущений можно по крайней мере двумя способами, измеряя фактическое положение с помощью соответствующего датчика.

Метод последовательного приближения к искомому положению. На каждом шаге за начальную координату нового цикла управления берется координата, измеренная на предыдущем шаге. На первом шаге, т. е. в первом приближении, в качестве начальной координаты выбирается координата, измеренная в точке остановки. При условии что системы управления обладают достаточной чувствительностью, этот метод быстро приводит к искомому результату, удлиняя время позиционирования.

Введение обратной связи в конце хода. Переход в режим позиционирования в желаемой точке позволяет обеспечить необходимую точность, но увеличивает длительность позиционирования и требует более сложной системы управления. Ниже рассмотрены другие типы ограничений.

Движение с ограничениями по скорости и ускорению. Если добавить ограничение по скорости

$$|v| \leq b, \quad (7)$$

закон изменения скорости из треугольного становится трапецеидальным (рис. 14).

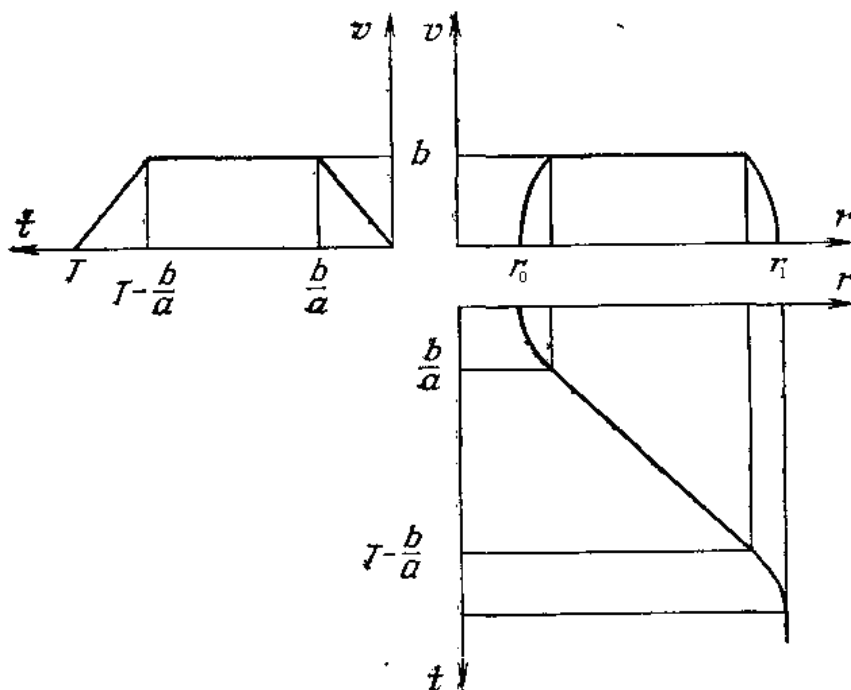


Рис. 14. Изменение скорости в системе с ограничениями по скорости и ускорению

На рис. 15 показан закон изменения сигнала управления в случае чисто инерционной нагрузки. Он может быть реализован при управлении с помощью коммутаций цепей или устройств системы, происходящих через заданные интервалы времени или, что предпочтительнее, при прохождении через определенные точки в пространстве.

Примечание. В случае использования шагового двигателя скорость изменяется по трапецеидальному закону, так как эти двигатели имеют конструкцию, при которой естественно возникают ограничения по скорости и ускорению.

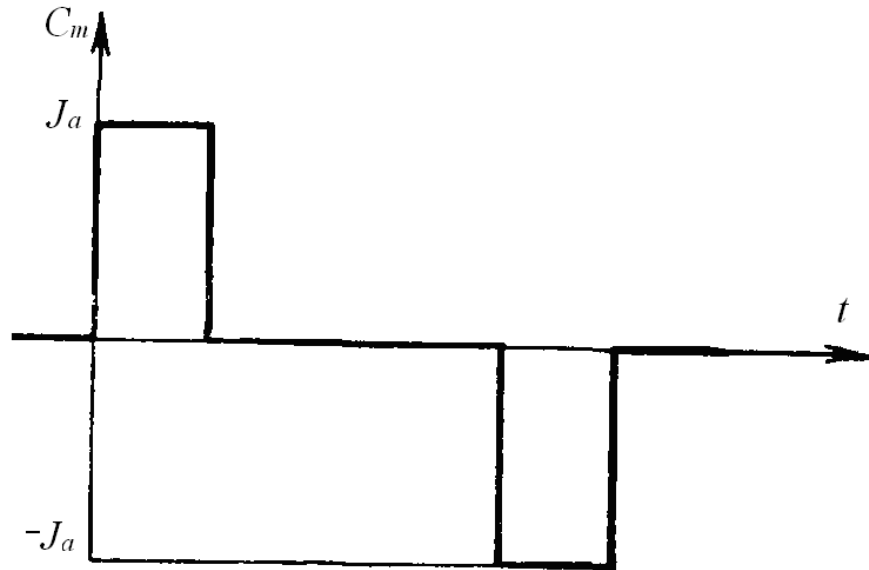


Рис. 15. Закон управления при наличии ограничений по скорости и ускорению при инерционной нагрузке

Выбор двигателя и редуктора. Звенья манипулятора часто приводятся в движение через редуктор с передаточным отношением λ . Обозначим через J_c момент инерции кинематической пары относительно оси шарнира, J_m – момент инерции двигателя относительно оси, Γ_n – номинальный вращающий момент и Ω_n – номинальную скорость вращения двигателя. Выбранный привод должен удовлетворять следующим условиям:

$$\Gamma \geq [(J_c/\lambda) + \lambda J_m] a; \quad (8)$$

$$\Omega_n \geq \lambda b. \quad (9)$$

Если в обоих выражениях (8) и (9) имеет место равенство, привод (двигатель – редуктор) называется согласованным (так как все требования выполнены в точности). Если же Γ_n , и (или) Ω_n превышают требуемые значения, привод обладает запасом мощности, который может быть полезным в случае, когда необходимо устранить отклонения от нормальных режимов управления (зона безопасности движения по моменту сил и (или) скорости). Что же касается согласованного привода, его момент минимален для оптимального передаточного отношения редуктора, равного

$$\lambda^0 = \sqrt{J_c/J_m}. \quad (10)$$

В этом случае привод согласован с нагрузкой при следующих номинальных параметрах:

$$\Gamma_n^0 = 2a\sqrt{J_c J_m}; \quad \Omega_n^0 = b\sqrt{J_c/J_m}; \quad W_n^0 = 2abJ_c. \quad (11)$$

Такой привод называется пересогласованным. Его номинальная мощность больше, а кинетическая энергия больше энергии нагрузки, случайные возмущения которой в малой степени сказываются на передаче движения.

Для $\lambda > \lambda_0$ наблюдается обратная ситуация. В этом случае привод называется недосогласованным.

На практике условие согласования не всегда выполняется, причем в равной степени должны учитываться другие факторы, такие как жесткость и масса редуктора, явление самоторможения в механических системах, установка модулей устройств системы обратной связи для устранения механических колебаний и т. д.

Примечание. Двигатель и связанный с ним редуктор можно легко выбрать, пользуясь данными по диапазонам возможных скоростей нарастания пускового момента и удвоенных значений кинетической энергии ротора для двигателей различного типа.

Движение при ограничениях на скорость и ускорение, исключающих возможность возникновения удара. Иногда нельзя резко (скачкообразно) изменять ускорение, потому что управляемые устройства могут испытать удар. В этом случае ограничивают скорость изменения ускорения:

$$\left| d^2v/dt^2 \right| \geq c. \quad (12)$$

Закон плавного изменения скорости соблюдается с помощью соответствующего управления и может быть получен, например, при подключении интегратора, формирующего сигнал, пропорциональный требуемому моменту двигателя (рис. 16 и 17).

Примечание. Ограничение (12) является не очень строгим и неявно учитывается при введении между устройством и двигателем

соответствующего фильтра низких частот, «сглаживающего острые углы» в законах изменения скорости, приведенных на рис. 1 и 4.

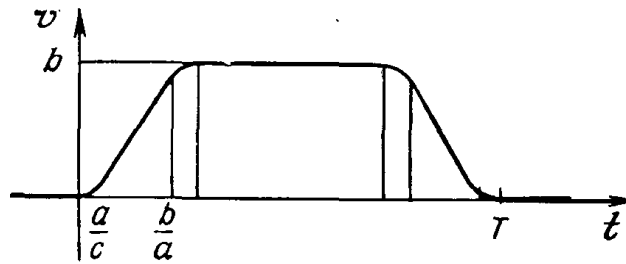


Рис. 16. Изменение скорости при ограничении $|d^2v/dt^2| \geq c$

Движение от точки к точке. Управление с помощью следящей системы. Основная идея управления с помощью следящей системы состоит в выборе величины требуемого конечного положения r_1 в качестве задающего сигнала r_c системы автоматического регулирования по положению. Иными словами, управление работой двигателя производится в зависимости от отклонения (называемого углом рассогласования в случае вращательных движений) между заданным и фактически полученным значением положения:

$$\varepsilon = r_c - r. \quad (13)$$

Рассмотрим примеры реализации этого принципа управления.

Система автоматического регулирования с двигателем постоянного тока, управляемым по току. В этом случае движущий момент пропорционален электрическому току. Если последний получен усилением сигнала ошибки ε , можно написать

$$C_m = K(r_c - r), \quad (14)$$

откуда

$$J(d^2r/dt^2) + Kr = Kr_c - c_r. \quad (15)$$

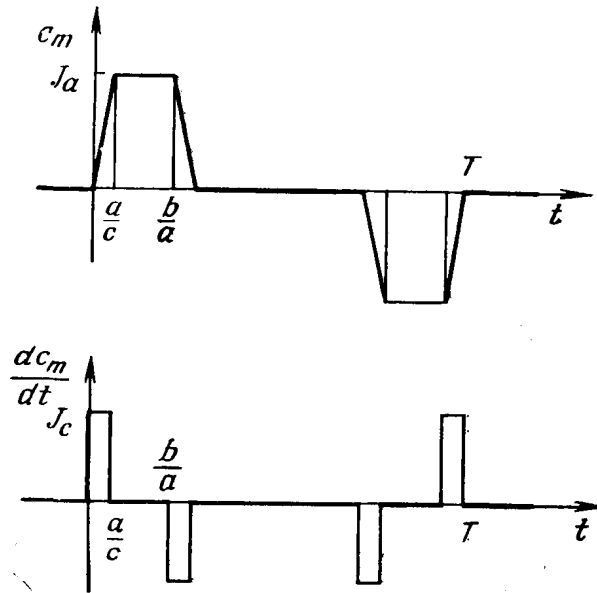


Рис.17. Закон управления движущим моментом

Итак, система автоматического регулирования эквивалентна механической системе, состоящей из ротора с моментом инерции J и пружиной с жесткостью K (рис. 18).

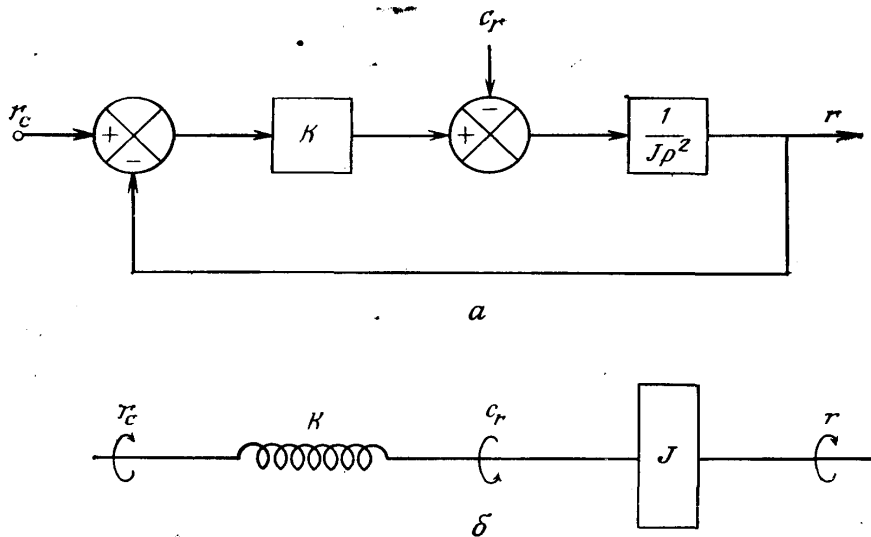


Рис. 18. Структурная схема системы автоматического регулирования по положению с двигателем постоянного тока, управляемым по току, (а) и эквивалентная механическая система (б)

Отсюда следует, что:

- в равновесном состоянии наличие момента сил сопротивления, не равных нулю, приводит к смещению по углу, т. е. к ошибке по

положению, обратно пропорциональной «жесткости» системы автоматического регулирования:

$$r_c - r = c_r / K; \quad (16)$$

- если момент сил сопротивления не содержит члена, связанного с трением, то система автоматического регулирования может быть представлена механическим колебательным звеном, переходными режимами которого нельзя пренебрегать.

Исследуем отдельно задачи точности определения положения a времени затухания переходного процесса.

Статическая точность определения положения. Предположим, что момент сил сопротивления равен сумме трех слагаемых, представляющих собой:

- вязкое трение $F_1(dv / dt)$ (равно 0 в равновесном состоянии);
- постоянный момент внешних сил (вблизи точки r_c) c_e ;
- сухое трение, при движении равное $c_s \text{sign}(dr / dt)$ и в состоянии равновесия принимающее произвольное значение из интервала $[-c_s, +c_s]$.

Следовательно, условие равновесия сочленения запишется в виде

$$C_m - C_e \in [-c_s + c_s], \quad (17)$$

откуда

$$r_c - r \in [(c_e - c_s) / K, (c_e + c_s) / K]. \quad (18)$$

Ошибка, возникающая при определении положения, представляется, таким образом, в виде суммы систематической ошибки, обусловленной смещением, пропорциональным моменту внешних сил в состоянии равновесия, и равной нулю при $c_e = 0$, и случайной ошибки, среднее значение которой равно нулю, а предельное значение пропорционально c_s . Обе составляющие обратно пропорциональны жесткости K . Отметим, что если сочленение неподвижно, то без вспомогательных устройств невозможно управлять перемещением, меньшим по величине $\Delta = c_s / K$. Следовательно, величина сухого трения характеризует предел разрешающей способности по положению.

Примечание. Эффект зоны нечувствительности («мертвой» зоны), обусловленный сухим трением, нельзя смешивать с гистерезисом, который определяется возможными зазорами, вызывающими мертвый

ход в системе передачи движения. Эти зазоры нежелательны с точки зрения устойчивости, но не вносят статической ошибки, если включены в цепь системы автоматического регулирования (даже если датчик помещен непосредственно на сочленении).

Затухание переходного процесса. Сухое трение, возникающее главным образом в связях скольжения между звеньями (твердыми телами) в органах передачи движения, обычно преобладает над вязким. В результате колебания с большой амплитудой при установлении величины выходного сигнала затухают медленно (рис. 19, б). На рис. 19, а показана в фазовой плоскости (r, ν) реакция системы на задающее ступенчатое воздействие r .

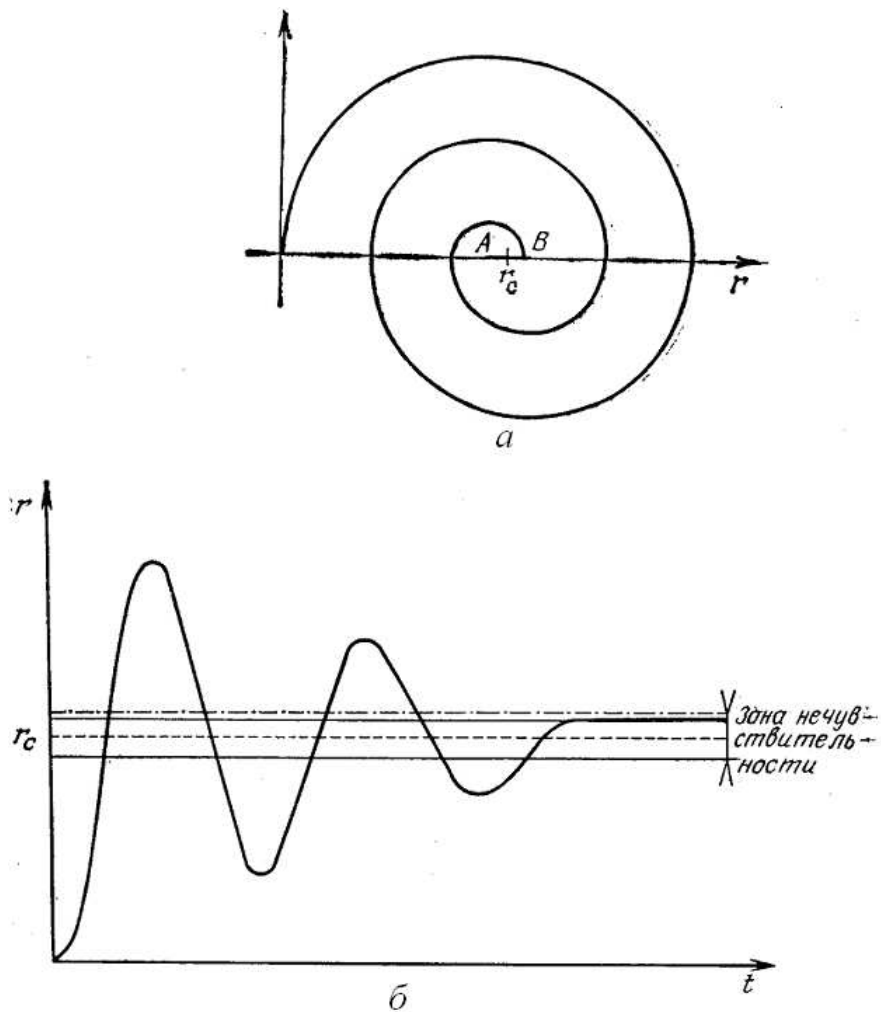


Рис. 19. Реакция на действие скачкообразного управляющего сигнала системы автоматического регулирования с микродвигателем, управляемым по току, при наличии сухого трения: а – траектория движения в фазовой плоскости; б – переходный процесс

Видно, что фазовая траектория состоит из полуокружностей, которые поочередно центрированы в точках $(r_c - \Delta, 0)$ и $(r_c + \Delta, 0)$ и координаты граничных точек которых образуют *колебательную последовательность*, заканчивающуюся при попадании конца какой-либо полуокружности в интервал $[r_c - \Delta, r_c + \Delta]$. Подобное затухание выходного сигнала недопустимо, так как при этом происходит превышение величины задающего сигнала, в результате чего может произойти удар.

Классическое решение данной проблемы состоит во введении дополнительного контура обратной связи по скорости (рис. 20). Это эквивалентно добавлению к действительному вязкому трению F_1 (если оно существует) фиктивного вязкого трения $F_2 = F - F_1$. Из эквивалентности функциональных схем, приведенных на рис. 20 и 21, следует, что передаточная функция H , соответствующая указанной связи, должна удовлетворять условию (19).

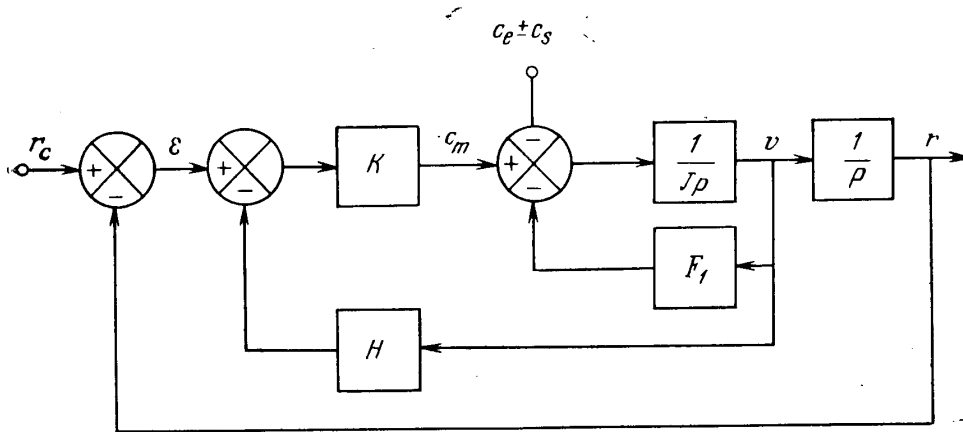


Рис. 20. Структурная схема системы автоматического регулирования с обратной связью по скорости

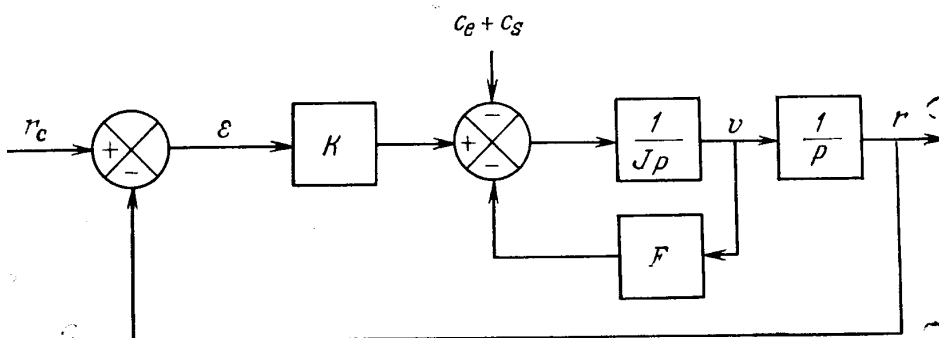


Рис. 21. Эквивалентная структурная схема системы автоматического регулирования с обратной связью по скорости

$$H = (F - F_1) / K. \quad (19)$$

Соответствующее дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$J(d^2r / dt^2) + F(dr / dt) + Kr = Kr_c - C_e - C_s \text{sign}(dr / dt). \quad (20)$$

Коэффициент затухания $\xi = F / 2\sqrt{JK}$ колебательного процесса, описываемого данным уравнением, будет больше или равен 1 в случае

$$F \geq 2\sqrt{JK} \quad (21)$$

При выполнении данного условия перемещение от точки к точке осуществляется без колебаний, причем вектор угловой скорости и, следовательно, момент сухого трения не изменяют направления (знака), в результате правая часть уравнения (20) имеет постоянное значение.

Примечание 1. Структурную схему, приведенную на рис. 20, можно привести к виду, показанному на рис. 22. Очевидно, из него вытекает новая интерпретация: внутренний контур представляет собой систему автоматического регулирования с задающим сигналом v_c , которая входит как часть в систему автоматического регулирования по положению (внешний контур).

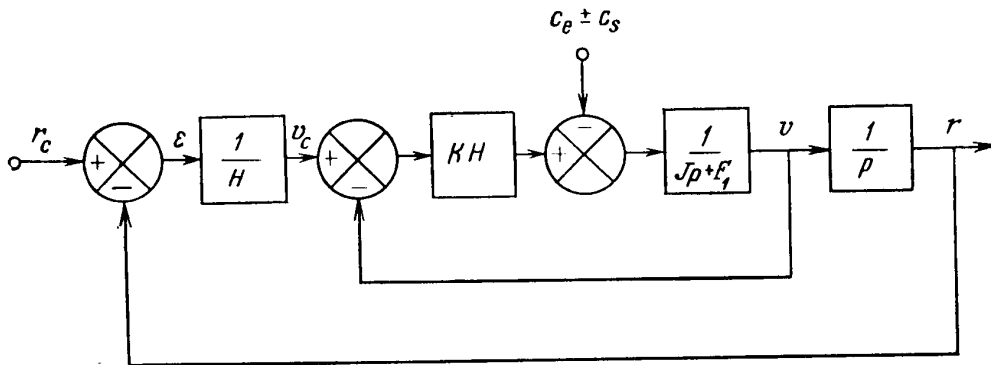
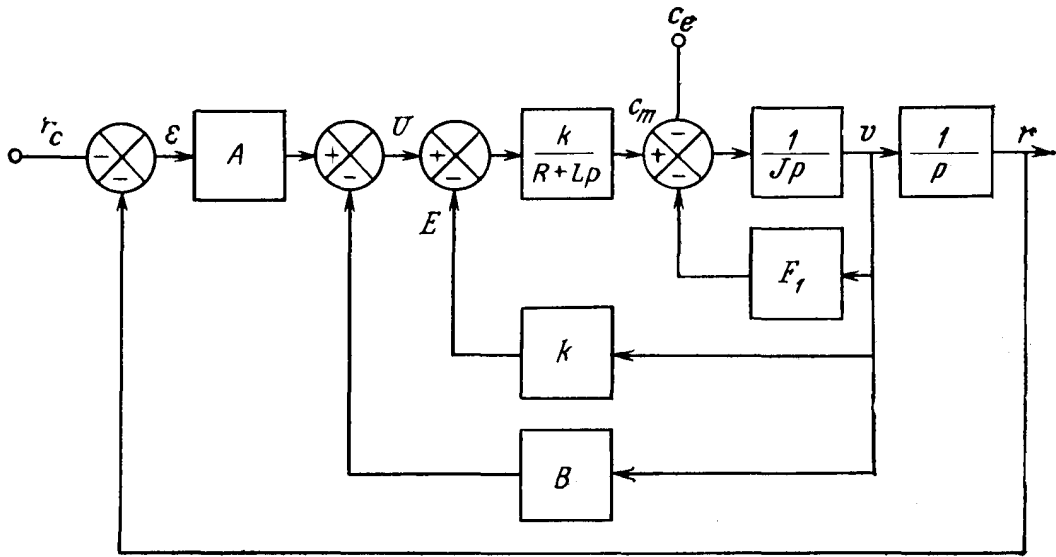


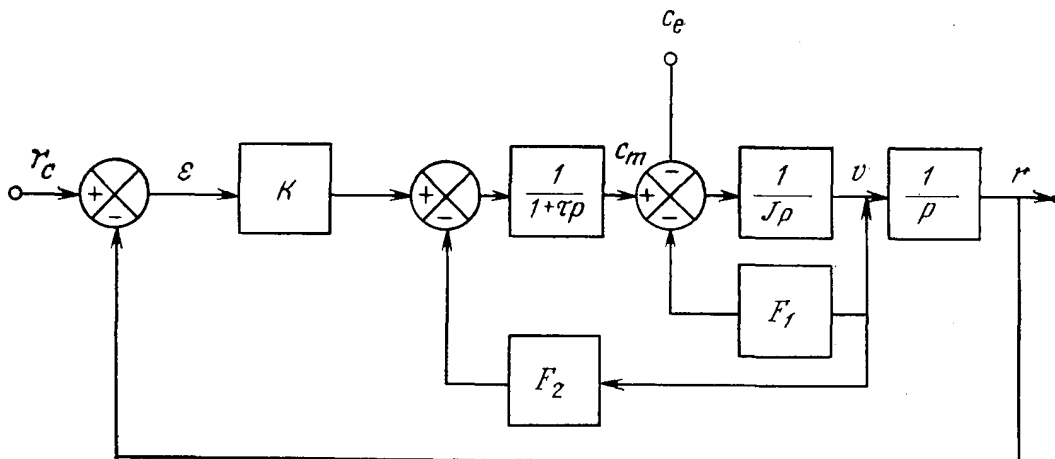
Рис. 22. Преобразованная структурная схема (рис. 20) с внутренним контуром с обратной связью по скорости

Примечание 2. Если существуют ограничения на предельные значения скорости и ускорения, то их выполнение можно обеспечить за счет введения нелинейных цепей (типа контуров насыщения) на выходе органов, вырабатывающих сигналы по скорости и ток управления i , пропорциональный движущему моменту.

Система автоматического регулирования с двигателем постоянного тока, управляемым по напряжению. На рис. 23 приведена схема системы автоматического регулирования по положению, управляемой напряжением на якоре.



a



б

Рис. 23. Структурная схема системы с обратной связью по положению с двигателем постоянного тока, управляемым по напряжению:
a – исходная схема; *б* – преобразованная схема

Ток, создающий вращающий момент, определяется разностью между напряжением управления и противо-э.д.с. E , пропорциональной скорости v . Это пример контура с обратной связью, который обуславливает затухание и эквивалентен скоростному контуру, но с коэффициентом k , зависящим от конструкции двигателя (в данном случае k – коэффициент электромеханической связи). Отсюда вытекает необходимость применения дополнительной обратной связи с регулируемым коэффициентом B , что требует включения специального датчика.

Если индуктивность E такова, что электрической постоянной времени $\tau = L / R$ можно пренебречь (например, в случае двигателя с плоским якорем), схему, приведенную на рис. 23, б, можно привести к исходной схеме для двигателя с обратной связью по току (см. рис. 21), но со значением

$$F = F_1 + (kB / R) + k^2 / R. \quad (22)$$

Последнее слагаемое в этом выражении присутствует всегда и представляет собой внутреннее трение двигателя, которое отсутствует в схеме с обратной связью по току. Второе слагаемое – фиктивное трение, обусловленное обратной связью по скорости.

Коэффициент усиления системы автоматического регулирования K равен

$$K = Ak / R, \quad (23)$$

где A – коэффициент преобразования сигнала в цепи усиления ошибки; R – сопротивление якоря.

В общем случае управление по напряжению приводит к необходимости учитывать электрическую постоянную времени τ . Это запаздывание нежелательно с точки зрения обеспечения устойчивости систем автоматического регулирования, которая имеет место при выполнении неравенства

$$K \leq F / \tau. \quad (24)$$

Электрогидравлические системы автоматического регулирования. Широкое применение получили гидроприводы с ограниченным ходом (гидроцилиндры) или неограниченным ходом (гидромоторы), управляемые с помощью следящих клапанов. Математическое описание для обоих типов приводов оказывается одинаковым. Но гидромоторы имеют преимущество в том смысле, что объем масла, находящегося в них под изменяющимся давлением, постоянен, т. е. не зависит от положения нагрузки. Это приводит к условиям инвариантности передаточных функций системы относительно положения нагрузки.

С этими небольшими оговорками можно записать два уравнения и для случая, когда следящие клапаны имеют квазимгновенную реакцию на движение нагрузки, учитывая то, что движущий момент пропорционален разности давлений:

$$J (dr^2 / dt^2) = C_m - C_e - F_1 (dr / dt); \quad (25)$$

$$\tau (dc_m / dt) + C_m = K (r_c - r) - F_2 (dr / dt). \quad (26)$$

Уравнения, записанные в такой форме, интерпретируются в виде структурной схемы, аналогичной той, которая представлена на рис. 23, б для двигателя постоянного тока, управляемого по напряжению. Но эта аналогия не должна вводить в заблуждение. В действительности обе системы существенно отличаются друг от друга, так как:

- постоянной времени τ пренебрегать нельзя (наоборот, она является основной величиной);
- естественное затухание, обусловленное F_2 , является очень слабым (в отсутствие связи по скорости), поскольку вызвано утечками, ограниченными по величине.

Разомкнутый контур представляет собой колебательное звено, связанное с интегратором, поэтому при реализации быстродействующей системы автоматического регулирования с сильным затуханием требуется не только скоростная обратная связь (или устройства демпфирования), но и связь по ускорению, определяемая изменением давления в полостях гидропривода.

Редко используются системы автоматического регулирования, в которых применяются два связанных между собой следящих привода: один с электрическим микродвигателем, а другой с гидравлическим двигателем (рис. 24, а). Их можно представить в виде двух независимых замкнутых контуров (электрического и гидравлического с различными мощностями, соединенными последовательно).

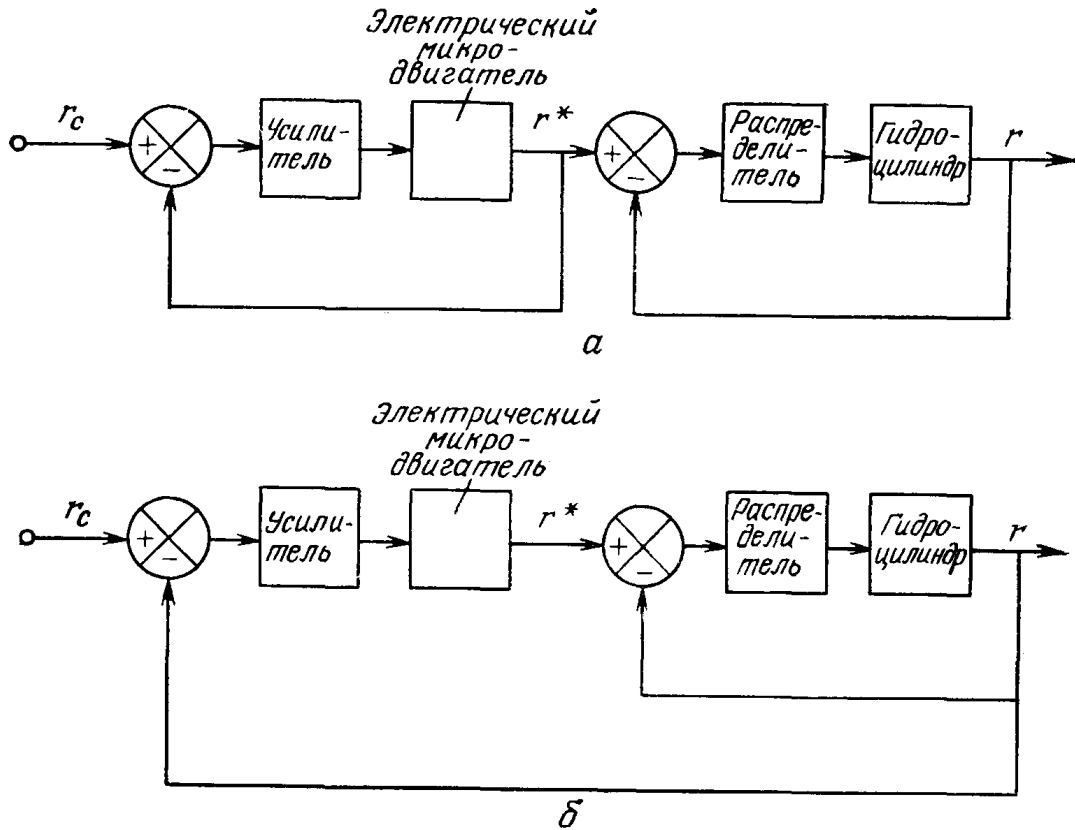


Рис. 24. Две схемы электрогидравлической системы автоматического регулирования для обеспечения движения манипулятора: а – с двумя независимыми обратными связями; б – с двумя зависимыми обратными связями

В этом случае времена реакции и погрешности, вносимые контурами, складываются. В действительности же рабочие характеристики такой системы практически определяются гидроприводом. Если точность работы гидропривода оказывается недостаточной, последний можно ввести в качестве элемента в цепь системы автоматического регулирования по положению, содержащей датчик на выходе, позволяющий получить две отрицательные

обратные связи (рис. 24, б). Однако управление такой системой усложняется из-за большого числа элементов.

4.2. Контурное управление

Осуществлением правильных относительных взаимных перемещений отдельных кинематических пар обеспечивается успешное формирование пространственной траектории манипулятора в целом. Поэтому ниже будет рассмотрено управление одним сочленением, описываемым обобщенной переменной r . Пусть переменная r изменяется во времени по закону $r = e(t)$. Существует два способа управления движением кинематической пары: управление по усилию (динамическое) и управление с помощью следящей системы.

Управление по усилию. Нагрузка на сочленение обычно зависит от относительного положения звеньев манипулятора и скорости их перемещения и является функцией времени. Уравнение движения имеет вид

$$C_m = J(r)(d^2r / dt^2) + C_r(r, dr / dt, t). \quad (27)$$

Если для заданного режима работы нагрузка в точности известна, то при подстановке $r = e(t)$, $dr / dt = de / dt$ из уравнения (27) получим закон изменения C_m во времени:

$$C_m = g(t). \quad (28)$$

Движущий момент, в свою очередь, связан с переменной управления u . Если эта зависимость представлена в виде

$$u = \varphi(c_m, dc_m / dt, d^2c_m / dt^2, \dots; t, dr / dt, \dots; t), \quad (29)$$

то легко получить выражение для требуемого сигнала управления

$$\ddot{y} = \varphi[\operatorname{tg}(t), (dg / dt), \dots; e(t), (de / dt), \dots; t] \quad (30)$$

или окончательно

$$\ddot{y} = h(t). \quad (31)$$

При подаче этого управляющего сигнала на привод заданное изменение $r = e(t)$ будет обеспечено лишь при выполнении следующих условий:

- фактические начальные условия действительно равны требуемым величинам, т. е.

$$r_0 = e(0), v_0 = (de / dt) (0); \quad (32)$$

- сведения о моменте сил сопротивления являются точными, что исключает внешние возмущения или процессы, которые часто трудно подавить (сухое трение, удары, зазоры и т. д.);

- данные о приводе верны и хорошо известны даже при больших изменениях параметров, что не всегда представляется возможным, особенно в гидравлике, где очень трудно определить вязкость, сжимаемость, утечку, изменение нагрузки и т. п.

На практике, по-видимому, этот принцип управления может применяться в основном для выполнения не очень точных, но быстрых движений.

Управление по замкнутому контуру. Управление, описываемое формулой (31), полностью соответствует управлению по разомкнутому циклу и проводится с опережением по времени: сигнал всегда посылается до окончания движения. Чтобы уменьшить влияние возмущений, можно перейти к полному или частичному управлению по замкнутому контуру (это тем не менее не делает его аналогичным управлению с помощью системы автоматического регулирования). Если закон движения $r = e(t)$ взаимно однозначен, можно написать

$$T = e^{-1}(r), \quad (33)$$

откуда получаем управление по положению по замкнутому контуру (при этом требуется соответствующий датчик):

$$\ddot{y} = f(r); \quad (34)$$

$$f = h[e^{-1}(r)]. \quad (35)$$

Иногда можно также привести соотношение $de / dt = k(t)$ к виду

$$t = k^{-1}(v), \quad (36)$$

откуда получаем управление по скорости по замкнутому контуру:

$$\ddot{y} = l(v); \quad (37)$$

$$l = h[k^{-1}(v)]. \quad (38)$$

Пример: можно проиллюстрировать сказанное выше на простом примере движения с постоянным торможением:

$$d^2r / dt^2 = -a,$$

что осуществляется двигателем постоянного тока, управляемым по напряжению.

Считаем начальную скорость заданной $v_0 = b$. Требуется, чтобы в момент $T = b / a$ координата r принимала конечное значение r_1 . Закон изменения скорости в интервале времени от 0 до T запишется в виде

$$v = k(t) = b - at; \quad (39)$$

$$r = e(t) = r_1 - [(b - at)^2 / 2a]. \quad (40)$$

в случае, когда начальное положение равно

$$r_0 = r_1 - (b^2 / 2a). \quad (41)$$

Для чисто инерциальной нагрузки движущий момент будет равен:

$$C_m = -Ja. \quad (42)$$

Этот момент связан с управляющим напряжением следующим соотношением:

$$u = (R / k)C_m + (L / k)(dc_m / dt) + kv. \quad (43)$$

В случае управления по разомкнутому контуру выражение (43) примет вид

$$\ddot{y} = -(RJ/k)a + kb - kat. \quad (44)$$

Аналогичный результат можно получить с помощью управления в замкнутом контуре по положению:

$$\ddot{y} = -(RJ/k)a + k(2a(r_1 - r))^{-2} \quad (45)$$

или по скорости

$$\ddot{y} = -(RJ/k)a + kv. \quad (46)$$

Примечание. Такие системы с постоянным торможением используются в некоторых роботах с цифровым управлением, замкнутый контур позиционирования которых обеспечивает быстрое протекание переходного процесса, исключаящее превышение заданного уровня.

Управление с помощью следящей системы. Системы автоматического регулирования обеспечивают слежение за изменяемым сигналом: $r_c = e(t)$, но неизбежно вносят динамическую ошибку, поскольку сигнал управления начинает вырабатываться с момента измерения этой ошибки (обратная связь действует без опережения). Динамическая точность системы может быть исследована двумя способами:

- если разложить функции $e(t)$ и $r(t)$ в ряд Фурье, их составляющие будут очень близки для частот в полосе пропускания следящей системы, однако вне полосы пропускания они будут различаться очень сильно.

При управлении с помощью системы автоматического регулирования по току полосу пропускания можно оценить, исходя из первой характеристической частоты замкнутого контура:

$$\omega_1 = K/F; \quad (47)$$

- другой способ состоит в представлении $e(t)$ в виде разложения в ряд по степеням t :

$$e = e_0 + at + \beta(t^2/2) + \dots \quad (48)$$

Системы автоматического регулирования, содержащие в разомкнутом контуре только один интегратор, имеют нулевую ошибку рассогласования при действии постоянного входного сигнала, конечную ошибку при линейном входном сигнале и возрастающую ошибку при параболическом входном сигнале (если рассматривать процессы неограниченной длительности).

Когда допустимо приближение первого порядка, то

$$r \approx e_0 + \alpha(t - T); \quad (49)$$

$$T = F / K. \quad (50)$$

Следовательно, всегда целесообразно повышать коэффициент усиления системы автоматического регулирования. Это позволит не только уменьшить статические ошибки в определении положения, вызванные наличием постоянных внешних усилий (например, силы тяжести), но также снизить ошибки в переходном режиме. Однако коэффициент усиления ограничивается требованиями устойчивости и временем затухания. Кроме того, для осуществления заданных перемещений с высокой точностью желательно уменьшить коэффициент усиления системы автоматического регулирования, чтобы было можно использовать системы, адаптирующиеся к внешним условиям.

Отметим тем не менее, что недостаточно высокое значение коэффициента усиления может привести к некоторым другим трудностям.

Прерывистость движения. Сухое трение, которым часто пренебрегают в первом приближении, может быть причиной нежелательных явлений, когда оно сопутствует, с одной стороны, силам инерции, а с другой – силам упругости механических элементов (недостаточная жесткость звеньев, сочленений или передач), гидроприводов (сжимаемость жидкости или газа) или систем автоматического регулирования (небесконечный коэффициент усиления).

В статике мы констатировали существование зоны нечувствительности $\pm \Delta$, величина которой

$$\Delta = c_s / K. \quad (51)$$

В динамике может появиться прерывистость движения (скачкообразность), т. е. чередование скачков и внезапных остановок, которых необходимо избегать.

Опишем данное явление для одной следящей системы (см. рис. 18) без обратной связи по скорости, но при большой величине сухого трения (эта ситуация часто встречается при низких скоростях, когда имеется вязкое трение).

Попробуем на очень простых моделях объяснить возникновение данного явления, проявление которого различно из-за сложной природы трения взаимодействующих звеньев. Полученные результаты дают только качественное представление.

Математическое описание. Во многих случаях усилие c_0 , необходимое для приведения в движение звена, находящегося в покое, превышает величину усилия c_s , прикладываемого во время движения для преодоления сил реакции. Рассмотрим идеализированный закон изменения трения от скорости (рис. 25).

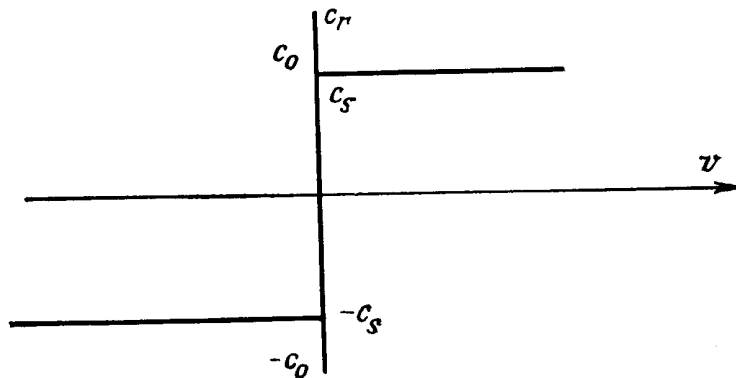


Рис. 25. Идеализированный закон изменения трения

Считается, что в равновесии

$$(dr / dt = 0) \wedge (d^2r / dt^2 = 0)$$

и условие равновесия записывается в виде

$$c_m \in [-c_0, +c_0], \quad (52)$$

а в движении

$$(dr / dt \neq 0) \vee (d^2r / dt^2 \neq 0),$$

и уравнение движения записывается в виде

$$c_m = J(d^2r / dt^2) + c_s \text{sign}(dr / dt). \quad (53)$$

Для рассматриваемой системы автоматического регулирования движущий момент пропорционален отклонению сочленения

$$C_m = K(r_c - r), \quad (54)$$

и мы рассматриваем случай, когда задающий сигнал линеен, т. е. когда предполагается движение с постоянной скоростью:

$$r_c = \bar{u}t, \quad (\bar{u} > 0). \quad (55)$$

Запаздывание в начале движения (рис. 26). Система, первоначально находящаяся в покое, не может начать двигаться до тех пор, пока задающий сигнал не достигнет величины, достаточной для того, чтобы c_m стало больше c_0 . В результате происходит задержка, равная

$$t_0 = c_0 / K \bar{u}. \quad (56)$$

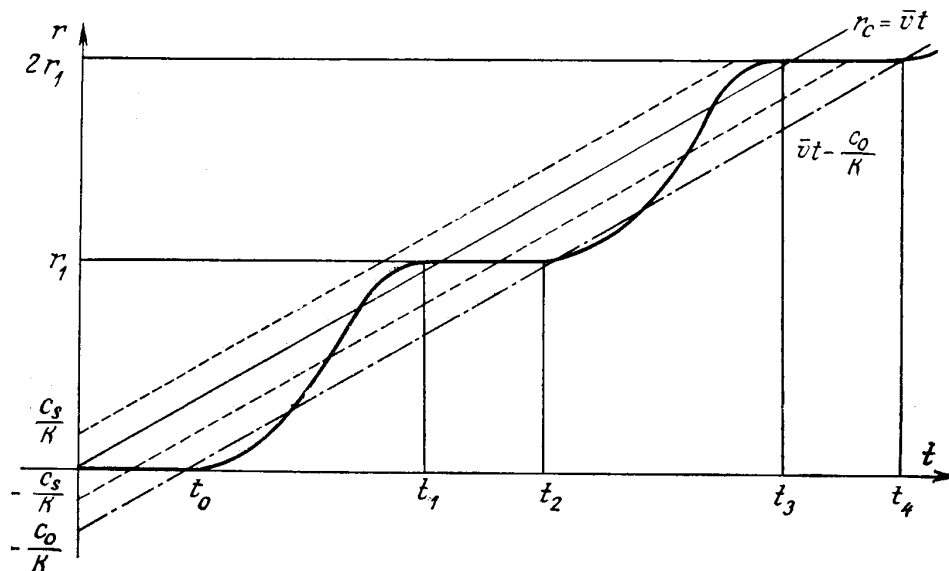


Рис. 26. Возникновение прерывистости движения под действием сухого трения

Движение с положительной скоростью. Пусть $\omega = \sqrt{K/J}$ – собственная круговая частота механической системы. Трогание с места при начале движения в момент t_0 происходит с положительной скоростью до момента t_1 , который необходимо определить. В интервале t_0-t_1 уравнение можно записать в виде

$$(1 / \omega^2)(d^2r / dt^2) + r = \bar{u}t - (c_s / K); \quad (57)$$

$$r(t_0) = 0, (dr / dt)(t_0) = 0.$$

Отсюда получаем

$$r = \bar{u}[(t - t_0) - \sin\omega(t - t_0) / \omega] + (c_0 - c_s)[1 - \cos\omega(t_1 - t_0)] / K; \quad (58)$$

$$dv / dt = \bar{u}[1 - \cos\omega(t - t_0)] + \omega(c_0 - c_s)\sin\omega(t - t_0) / K.$$

Скорость становится равной нулю в момент t_1 , определяемый выражением

$$t_1 = t_0 + \frac{2}{\omega} \left[\pi - \arctg \frac{\omega(c_0 - c_s)}{Kv} \right], \quad (59)$$

при котором положение сочленения определяется формулой

$$r_1 = \bar{u}t_1 + (c_0 / K) - 2c_s / K, \quad (60)$$

а движущий момент – выражением

$$c_m(t_1) = c_0 - 2c_s. \quad (61)$$

До момента времени t ускорение отрицательно (замедление), и движение должно было бы продолжаться с отрицательной скоростью. Но уравнение движения теряет силу, так как перемена знака скорости изменяет направление момента силы сухого трения. При этом уравнение движения принимает вид

$$(1 / \omega^2)(d^2r / dt^2) + r = \bar{u}t + (c_s / K); \quad (62)$$

$$r(t_1) = r_1, (dr / dt)(t_1) = 0.$$

Следовательно, в момент времени t ускорение испытывает положительный скачок $2\omega^2 c_s / K$. При этом возможны две ситуации:

- *движение с отрицательной скоростью.* В этой ситуации величина сигнала недостаточна для того, чтобы изменить знак ускорения, и движение продолжается с отрицательной скоростью по синусоидальному закону вплоть до другого нулевого значения скорости при t_1 . Это возможно, если

$$(1 / \omega^2)(d^2r / dt^2)(t_1) \leq 0, \quad (63)$$

т. е., учитывая уравнения (62), получим следующее неравенство:

$$r_1 - \bar{v}t_1 \geq c_s / K.$$

Данное неравенство имеет место (в соответствии с формулой (60)) только в очень редком случае, т. е. когда статический момент сил трения c_0 значительно больше момента сил трения при движении c_s , т. е.

$$c_0 \geq 3c_s. \quad (64)$$

В любом случае после одного или нескольких полупериодов колебаний всегда возникает вторая ситуация;

- *прерывание движения.* В этом случае скачок ускорения достаточен, чтобы изменить знак производной d^2r / dt^2 . Это должно привести к движению с положительной скоростью, что находится в противоречии с условиями, при которых записаны уравнения (62). Отсюда следует, что движение прекращается. Следовательно, система остановится в точке $r = r_1$ и будет находиться в равновесии, пока выполнено условие (52), т. е. в течение конечного интервала времени

$$t_2 - t_1 = 2(c_0 - c_s) / K\bar{v}. \quad (65)$$

Начиная с момента t_2 движение будет протекать аналогично тому, как оно происходило с момента 0. Таким образом, движение носит периодический характер с периодом

$$T = \frac{2}{\omega} \left[\pi + \omega \frac{c_0 - c_s}{Kv} - \arctg \left(\omega \left(\frac{c_0 - c_s}{Kv} \right) \right) \right] \quad (66)$$

и состоит из серии скачков с амплитудой r_1 (см. рис. 26).

Итак, в соответствии с рассмотренным выше, прерывистое движение проявляется в роботах при низких скоростях движения сочленений (например, для механизмов передачи, работающих при малой начальной скорости движения). Но еще чаще это явление возникает при малых перемещениях, когда имеет место трение между переносимым роботом объектом и предметами внешней среды (например, сборка с помощью активной самокорректирующейся системы).

4.3. Управление по усилию

В системе автоматического регулирования по положению исполнительный орган робота должен занять заданное положение независимо от действия внешних сил или моментов, которые к нему приложены. В системе автоматического регулирования по силе, или МОМСИТ, (рис. 27) с заданной величиной сравнивается, наоборот, усилие, развиваемое приводом. Следовательно, в любой момент времени исполнительный орган занимает положение (заранее не известное), при котором противодействующее усилие имеет заданное значение. Эти системы управления можно использовать для различных целей:

- «мягкого» сближения (без ударов) исполнительного устройства с внешними объектами благодаря задающему сигналу малой величины;
- выполнения движения в известном направлении под действием постоянной силы (например, силовая вставка);
- захвата исполнительным устройством с заданной силой сжатия;
- осуществления ограниченных движений, таких как открывание двери. В этом случае расположение дверных петель может быть не уточнено и вместо точного воспроизведения заданной траектории манипулятора, пригодной лишь для конкретного расположения дверных петель, оказывается проще регулировать усилия противодействия со стороны двери, испытываемые роботом;

- выполнения с помощью манипулятора пространственного перемещения, задаваемого человеком-оператором, который устанавливает вручную положение системы, причем последняя не оказывает никакого сопротивления, если приводится в действие следящей системой по усилению с пугевым задающим сигналом.

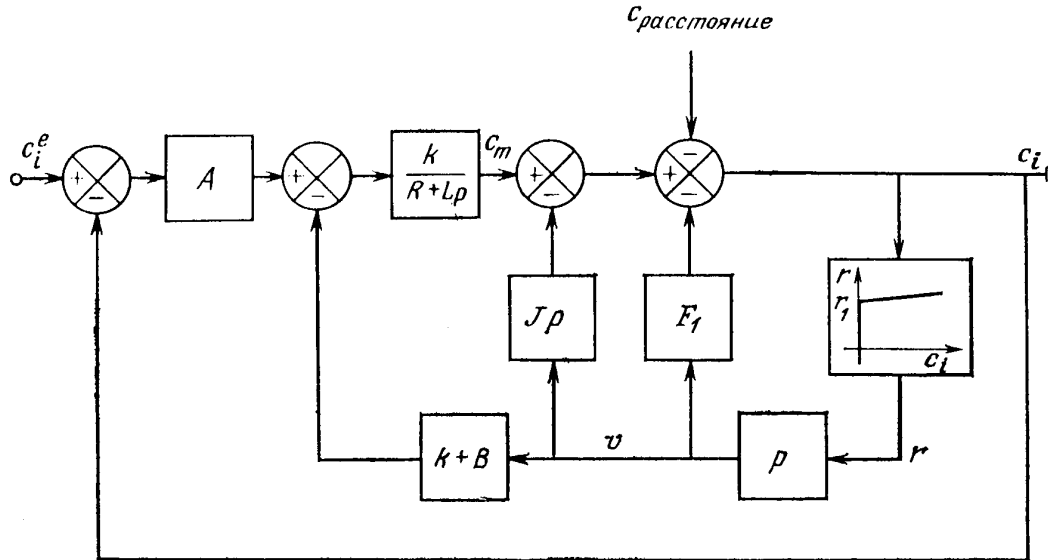


Рис. 27. Структурная схема системы автоматического регулирования с двигателем постоянного тока, управляемым по напряжению, и с обратной связью по моменту нагрузки

При реализации подобных систем автоматического регулирования возникает проблема разработки датчиков оцувствления. Полученные контуры управления имеют динамику, существенно отличающуюся от динамики регулирования по положению.

На рис. 27 приведена схема следящей системы с двигателем постоянного тока, управляемого по напряжению. Сигнал управления определяется величиной усилия взаимодействия с внешней средой. Отметим, что для $r < r_1$ система функционирует как разомкнутый контур, т. е. отсутствует взаимодействие с внешней средой, и момент взаимодействия равен нулю. Напротив, с превышением r_1 возникает процесс взаимодействия, и момент сил очень быстро увеличивается (с повышенным коэффициентом усиления K) до

$$c_i = K(r - r_1). \quad (67)$$

Возможно существование и других моментов сопротивления, обусловленных взаимодействием на расстоянии (сила тяжести) или силами трения.

Для электрогидравлических следящих систем с обычным следящим клапаном схема системы будет идентична схеме с двигателем постоянного тока.

4.4. Система управления двустороннего действия

Система управления двустороннего действия состоит из двух систем одного типа (но необязательно идентичных) – «ведомой» и «ведущей». Ведомая система представляет собой обычную систему автоматического регулирования по положению: под действием заданного сигнала r_c^e и усилия c^e она будет принимать выходное положение r^e , отличающееся от заданного в среднем на

$$rc^e - r^e = c^e / K_e, \quad (68)$$

где K_e – коэффициент усиления ведомой системы автоматического регулирования с передаточной функцией $K_e H_e(p)$, связывающей движущий момент с отклонением от заданного положения (рис. 28, а).

Ведущая система представляет собой такую же систему автоматического регулирования по положению с коэффициентом усиления K_m , воздействием r_c^m и выходным сигналом r_m . Величиной c_m обозначают момент внешних сил, который считается положительным, если его направление совпадает с направлением момента вращения двигателя.

Согласование ведущей системы с ведомой состоит в том, что сигнал на выходе одной системы является задающим для другой и наоборот, т. е.

$$r_c^e = r^m, r_c^m = r^e. \quad (69)$$

В системе двустороннего действия возможны два режима работы (рис. 28).

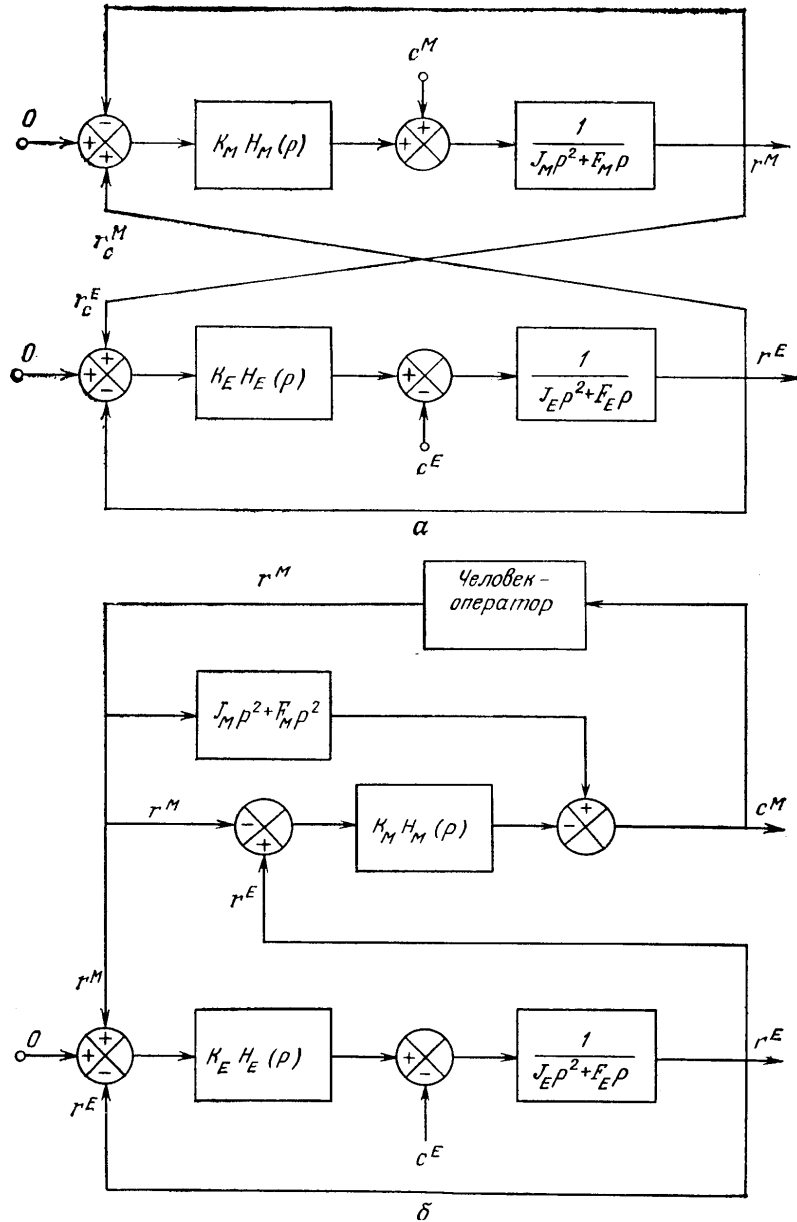


Рис. 28. Структурная схема системы автоматического регулирования двустороннего действия: а – режим покоя; б – рабочий режим

Рабочий режим (рис. 28, б). Человек-оператор вручную управляет положением ведущей системы r^m , тем самым изменяя обычный порядок управления движением. В результате он вырабатывает сигнал управления на вход ведомой системы, которая под его действием изменяется и направляет на вход ведущей системы сигнал $r_c^m = r^m$.

В свою очередь, человек-оператор ощущает ответное усилие c^m , необходимое для поддержания выходного сигнала ведущей системы.

Это усилие, изменяющееся во время движения, в устойчивом состоянии принимает значение

$$c^m = -K_m(r_c^m - r^m). \quad (70)$$

Отсюда с учетом выражения (68) получаем

$$c^m = (K_m / K_e)c^e. \quad (71)$$

Таким образом, воспринимаемое усилие c^m пропорционально моменту сил, который должна обеспечить ведомая система с коэффициентом пропорциональности, равным отношению коэффициентов усиления двух систем автоматического регулирования. Это позволяет произвольно увеличить или уменьшить усилия обратной связи в зависимости от эргономических требований.

Если предположить, что человек-оператор не вносит динамических искажений в систему управления, то асимптотическая устойчивость системы двустороннего действия совпадает с устойчивостью ведомой системы автоматического регулирования.

Режим покоя (рис. 28, а). Если в устойчивом состоянии и при отсутствии усилия c^e на ведомую систему человек-оператор «отпускает» ведущую ($c^m = 0$), то системы вновь принимают обычный порядок управления. Система двустороннего действия может оставаться в устойчивом состоянии в указанном выше случае (при этом $r^e = r^m$), если составленная из двух спаренных контуров система автоматического регулирования асимптотически устойчива. Пусть

$$G_i(p) = K_i H_i(p) / (J_i^2 p^2 + F_i p), \quad (i = m \text{ или } e). \quad (72)$$

Тогда характеристическое уравнение имеет вид

$$1 + G^m(p) + G^e(p) = 0. \quad (73)$$

В случае применения двухпозиционных двигателей, управляемых по току, $H_i(p) = 1$ и легко проверить, что устойчивость всегда обеспечивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянин П. Н. Промышленные роботы и их применение. – М.: Машиностроение, 1983. – 312 с.

2. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов / Под ред. Е. П. Попова. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

3. Грубе А. Э., Санев В. И. Автоматизация станочной обработки деталей в деревообрабатывающей промышленности. – М.: Лесная пром-сть, 1964. – 184 с.

4. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Манипуляционные системы роботов. – М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.

5. Челпанов И. Б. Устройство промышленных роботов: Учебник для учащихся приборостроительных техникумов. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	3
1. Программа дисциплины	6
2. Основные понятия и определения.	8
3. Исполнительные системы робота	14
4. Системы автоматического регулирования движением манипулятора.	21
.	
4.1. Движение от точки к точке. Импульсное управление . . .	22
4.2. Контурное управление.	38
4.3. Управление по усилию	47
4.4. Система управления двустороннего действия.	49
Литература.	52

Учебное издание

**ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. РОБОТЫ
И МАНИПУЛЯТОРЫ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ
ПРОИЗВОДСТВ**

Учебно-методическое пособие

Составитель **Кравченко** Анатолий Сергеевич

Редактор Ю. А. Ирхина

Подписано в печать 20.09.2006. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 3,2.
Тираж 50 экз. Заказ .

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.