

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра электротехники, электропривода
и промышленной электроники

**Структурный анализ и синтез
манипуляторов роботов
с последовательной кинематикой**

Часть 1

Методические указания
к выполнению практических работ
и организации самостоятельной работы

Новокузнецк
2019

УДК 621.865.8 (07)

С 873

Составители:

Богдановская Татьяна Вениаминовна

Игнатенко Оксана Александровна

Кубарев Василий Анатольевич

Рецензент

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
автоматизации и информационных систем СибГИУ

М. В. Ляховец

С 873 Структурный анализ и синтез манипуляторов роботов с последовательной кинематикой. Часть 1 : методические указания / М-во науки и высш. образования Российской Федерации, Сиб. гос. индустр. ун-т, Каф. электротехники, электропривода и промышленной электроники ; сост.: Т. В. Богдановская, О. А. Игнатенко, В. А. Кубарев. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2019. – URL: <http://library.sibsiu.ru>. – Текст : электронный.

Излагаются основные методы и инструменты структурного анализа кинематики промышленных манипуляторов роботов с последовательной структурой, способы математического и геометрического описания.

Предназначены для обучающихся очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по дисциплине «Основы мехатроники», 11.03.04 Электроника и наноэлектроника по дисциплине «Основы мехатроники и робототехники».

Публикуется по решению комиссии по совершенствованию учебно-методической работы в Институте информационных технологий и автоматизированных систем при ученом совете ИТиАС (протокол № 6 от 03.09.2019 г.).

Издано в полном соответствии с авторским оригиналом.

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Кинематические пары и их классификация.....	6
1.1 Свойства низших кинематических пар	14
1.2 Свойства высших кинематических пар	15
2 Кинематическая цепь. Структурная формула кинематической цепи	18
3 Пространственные системы координат перемещения схвата манипулятора робота	19
4 Маневренность манипулятора робота.....	25
5 Рабочий объем и зона обслуживания манипулятора робота.....	37
6 Угол сервиса и коэффициент сервиса манипулятора робота	39
6.1 Определение коэффициента сервиса методом объемов	41
7 Структура манипуляторов робота. Геометро- кинематические характеристики	45
8 Индивидуальные задания структурного и кинематического анализа манипулятора робота	52
8.1 Задание	52
8.2 Пример структурного и кинематического анализа	53
9 Контрольные вопросы для самопроверки	55
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	56
Приложение А Индивидуальные задания к практической работе	58

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Государственным стандартом (ГОСТ 25686-85 "Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения") *промышленный робот* (ПР) определяется как автоматическая машина, стационарная или подвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Манипулятор – это устройство, предназначенное для замены функций руки человека. Существуют манипуляторы с ручным управлением и с автоматическим, программируемым. Последние получают движение от приводов, работающих по заданной программе и называются роботами.

Первый промышленный робот (ПР) был создан в 1962 г. фирмой «Unimation». Это была механическая рука с программным управлением, которая представляла собой пространственную незамкнутую кинематическую цепь, состоящую из нескольких звеньев, имеющих возможность относительного движения. Подобно человеческому плечу, предплечью, кисти, соединенных между собой суставами, звенья механической руки (манипулятора) могли совершать независимые движения в пространстве.

В дальнейшем с развитием робототехники сходство манипуляторов с рукой человека стало утрачиваться, в структурные схемы стали вводиться различные виды кинематических пар, появилась возможность изменения длин звеньев и т.д. Современный

манипулятор промышленного робота предназначен для выполнения двигательных функций и конструктивно состоит из опорных (несущих) конструкций, манипуляционной системы, рабочих органов, привода и устройства передвижения.

Основы робототехники – это дисциплина, посвященная изучению строения манипуляторов, синтезу кинематических схем роботов и автоматизированных технических систем. Роботы необходимы там, где человеку работать тяжело, опасно, или вообще невозможно, а также в условиях, где необходима идеальная точность операций. Например, робот может вести работы в радиоактивной среде, в вакууме, может обезвредить взрывное устройство или провести микрохирургическую операцию. Для каждого вида работы нужен специальный робот. Всю робототехнику можно разделить по отраслям на промышленную, строительную, авиационную, космическую, подводную, военную.

Промышленные роботы, в свою очередь, подразделяются на три группы по производственно-технологическим признакам:

- производственные, или технологические, выполняющие основные операции технологических процессов;
- подъемно-транспортные, или вспомогательные (ПТПР), выполняющие вспомогательные действия типа "взять – перенести – положить";
- универсальные (УПР), выполняющие различные (и основные, и вспомогательные) операции.

Транспортные роботы предназначены для автоматизированного транспортирования объектов, а также для управления различными транспортными системами. Практическое развитие получили ныне наземные транспортные роботы, которые могут быть колесными, шагающими и гусеничными.

Наибольшее развитие и распространение в настоящее время получили колесные транспортные роботы, используемые достаточно широко в промышленных автоматизированных транспортно-складских системах и гибких автоматизированных производствах в виде мобильных автоматических кранов, автоматических управляемых тележек (АУТ), робокаров и др., оснащаемых во многих случаях различными манипуляционными устройствами.

Робототехника находится в родстве с мехатроникой; составляет ее определенную часть.

Основы мехатроники – это дисциплина, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

К мехатронике, например, относятся заводские станки с программным управлением, беспилотные транспортные средства, тормозная система автомобиля с антиблокировочной системой, современная офисная техника и прочее. Однако у роботов есть признак, который объединяет их со всеми живыми существами – движение. Поэтому робототехника связана, прежде всего, с изучением движения звеньев манипулятора, и во многом базируется на методических принципах теории механизмов и машин.

Манипулятор – как правило, открытая кинематическая цепь, соответствующая руке человека.

Одними из основных этапов проектирования манипуляторов являются структурный анализ и синтез его кинематической цепи, в результате которого выбирается рациональная схема механизма и задаются определенные его кинематические свойства.

1 Кинематические пары и их классификация

Механизм представляет собой кинематическую цепь (КЦ), звенья которой обладают полной определенностью движения. В свою очередь каждые два звена КЦ соединяются между собой кинематическими парами.

Кинематическая пара (КП) – подвижное соединение двух звеньев. Способы соединения звеньев с помощью КП весьма разнообразны. При соединении двух (или нескольких) звеньев посредством КП на их относительное движение накладывается некоторое число ограничений, называемых *связями*, зависящее от характера кинематических элементов звеньев.

Кинематический элемент (КЭ) – точка, линия или поверхность, по которой происходит соединение звеньев КП.

В общем случае всякое свободно движущееся в пространстве абсолютно твердое тело *ABC* (рисунок 1) обладает **шестью степенями свободы**. Движение такого тела может быть представлено

как вращение вокруг и скольжение вдоль трех произвольно выбранных взаимно перпендикулярных (\perp) осей X , Y , Z .

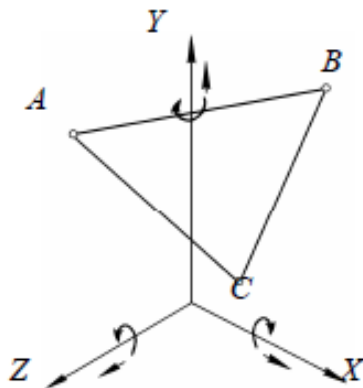


Рисунок 1 – Твердое тело в пространстве

Вхождение звена в КП с другим звеном налагает на относительное движение этих звеньев определенные условия связи. Очевидно, что число этих условий связи может быть только целым числом и должно быть < 6 , так как в том случае, когда число условий связи = числу степеней свободы, звенья теряют относительную подвижность и КП переходит в жесткое соединение двух звеньев (статическая пара).

Точно так же число условий связи не может быть меньше 1, т. к. в случае, когда число условий связи = 0, звенья не могут соприкаться, следовательно, КП перестает существовать и мы будем иметь два свободных тела, движущихся в пространстве независимо друг от друга.

Таким образом, число условий связи, наложенных на относительное движение каждого звена КП, изменяется в пределах от 1 до 5. Следовательно, число степеней свободы звена КП в относительном движении может быть выражено условием:

$$H = 6 - S, \quad (1)$$

где H – число степеней свободы звена после его присоединения в КП;
 S – число условий связи, налагаемых КП (изменяется от 1 до 5).

Из (1) следует, что H также может изменяться только от 1 до 5. Итак, связи, наложенные на относительное движение звеньев КП, ограничивают те возможные относительные движения, которыми обладают звенья.

Рассмотрим пример плоского движения (рисунок 2).

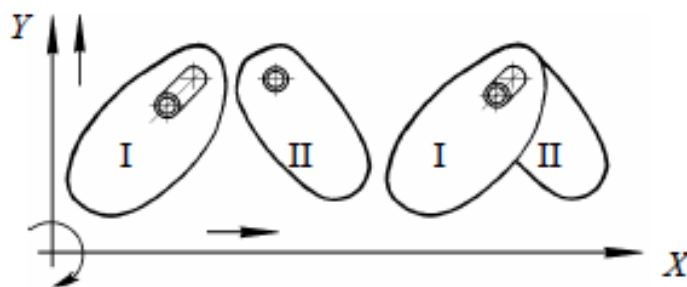


Рисунок 2 – Пример плоского движения

Свободное тело на плоскости обладает 3 степенями свободы, т. е. тело I и тело II обладают (каждое) 3-мя степенями свободы. Соединим их между собой так, чтобы осталось только одно возможное относительное движение между ними. У тела I наварим шип, а в теле II сверлим отверстие, соответствующее диаметру шипа. После соединения этих двух тел у них из 6 останется 4 степени свободы: 3 возможных совместных движения и 1 вращение друг относительно друга.

Соответствующим подбором соприкасающихся элементов звеньев можно устранить одно из вращательных движений вокруг какой-либо оси или одно из поступательных движений вдоль какой-либо оси или одно вращательное и одно поступательное одновременно или два вращательных одновременно и т. д.

Оставшиеся возможные движения могут быть или независимыми друг от друга или же быть друг с другом связаны каким-либо дополнительным геометрическим условием. Эти дополнительные условия могут быть выражены в виде некоторых уравнений, позволяющих определить функциональную зависимость между связанными движениями.

Оставшиеся независимые возможные движения будут характеризовать число степеней свободы звеньев КП в их относительном движении.

Рассмотрим КП с независимыми возможными движениями звеньев. Все КП подразделяются на 5 основных классов по количеству связей, наложенных на относительное движение звеньев.

Кинематические пары I класса – такие КП (рисунок 3), в которых на относительное движение каждого звена наложено 1 ограничение [1].

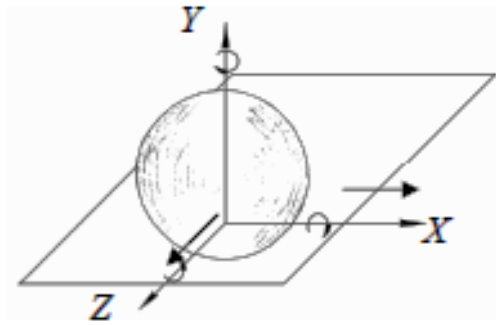


Рисунок 3 – Схема кинематической пары I-го класса

Здесь число условий связи (число ограничений) $S = 1$, число степеней свободы (степеней подвижности) $H = 5$, возможные движения: 3 вращения и 2 поступательные движения.

2-й вид пары I класса: 2 вращения и 3 поступательные движения создать нельзя, т. к. если мы будем иметь соприкосновение каких-либо двух геометрических элементов, то всегда относительное поступательное движение в направлении нормали к этим элементам уже является невозможным. Например, при соприкосновении шара с плоскостью невозможно его поступательное движение в направлении оси Y , которая служит нормалью к соприкасающимся телам. Иначе говоря, нельзя подобрать форму элемента КП, которая при соприкосновении допускала бы наличие трех поступательных движений. Всегда хотя бы одно поступательное движение будет исключено.

Кинематические пары II класса налагают на относительное движение каждого из входящих в них звеньев 2 ограничения (число связей $S = 2$). Число степеней свободы $H = 4$. Пары 1-го вида допускают 3 вращения и 1 поступательное движение каждого из звеньев (рисунок 4).

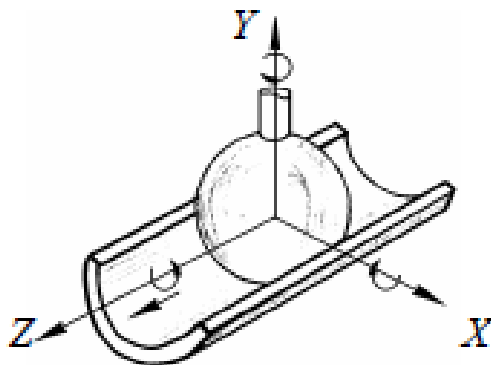


Рисунок 4 – Схема кинематической пары II-го класса 1-го вида

Пары II-го класса 2-го вида (рисунок 5) допускают 2 вращения и 2 поступательные движение каждого из звеньев.

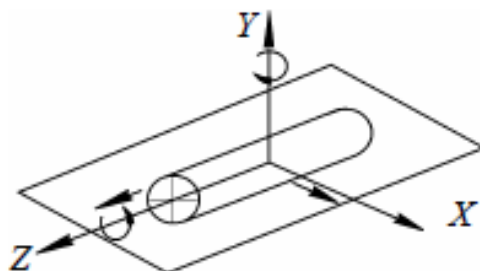
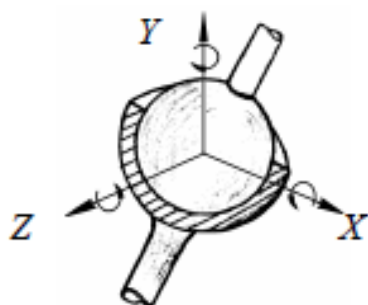


Рисунок 5 – Схема кинематической пары II-го класса 2-го вида

Теоретически возможны пары II-го класса 3-го вида, допускающие 1 вращение и 3 поступательные движения. Практически же эти пары воспроизведены быть не могут.

Кинематические пары III класса налагают на относительное движение каждого из входящих в них звеньев 3 ограничения (число связей $S = 3$). Число степеней свободы $H = 3$. Пары 1-го вида допускают только 3 вращения каждого из звеньев (пространственный шарнир Гука или сферический шарнир на рисунке 6).

1 вид:

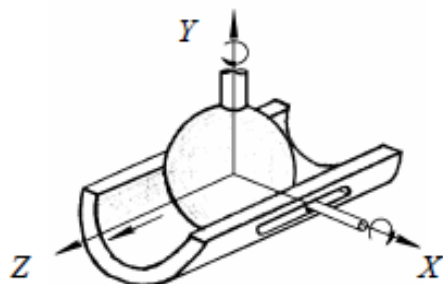


Условное обозначение сферического шарнира на схеме

Рисунок 6 – Схема кинематической пары III-го класса 1-го вида

Пары III класса 2-го вида допускают 2 вращения и 1 поступательное движение каждого из звеньев (рисунок 7).

2 вид:



Условное обозначение сферического шарнира с пальцем на схеме

Рисунок 7 – Схема кинематической пары III-го класса 2-го вида

Пары III класса 3-го вида допускают 2 поступательных движения и 1 вращение каждого из звеньев (рисунок 8).

3 вид:

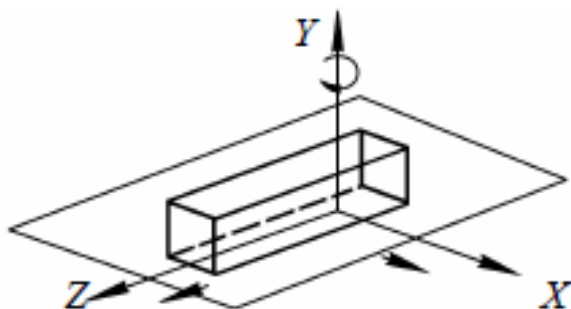


Рисунок 8 – Схема кинематической пары III-го класса 3-го вида

Пары III класса 4-го вида (3 поступательные движения) – клиновой механизм – на практике воспроизведены быть не могут.

Кинематические пары IV класса налагают на относительное движение каждого из входящих в них звеньев 4 ограничения ($S = 4$). Число степеней свободы $H = 2$. Пары IV класса 1-го вида допускают 2 вращения каждого из звеньев (рисунок 9).

1 вид:

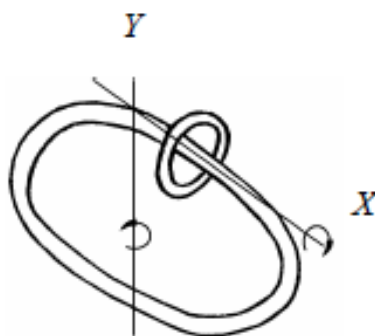
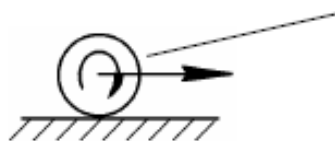
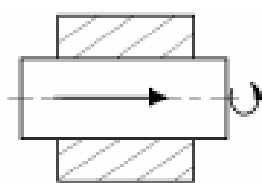


Рисунок 9 – Схема кинематической пары IV -го класса 1-го вида

Пары IV класса 2-го вида допускают 1 вращение и 1 поступательное движение каждого из звеньев (рисунок 10).

2 вид:

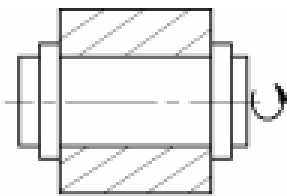


Качение цилиндра по плоскости с одновременным его проскальзыванием.

Рисунок 10 – Схема кинематической пары IV-го класса 2-го вида

Кинематические пары V класса налагают на относительное движение каждого из входящих в них звеньев 5 ограничений ($S = 5$). Число степеней свободы $H = 1$. Пары V класса 1-го вида допускают только 1 вращение каждого из звеньев (вращательная пара, плоский шарнир на рисунке 11).

1 вид:



Условные обозначения плоских шарниров на схеме

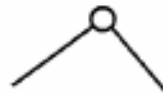
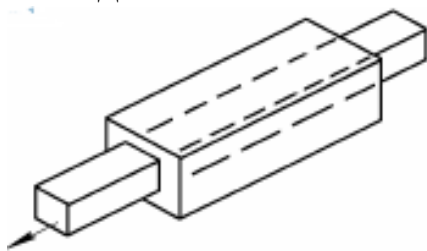


Рисунок 11 – Схема кинематической пары V -го класса 1-го вида

Пары V класса 2-го вида допускают только 1 поступательное движение каждого из звеньев (поступательная пара на рисунке 12).

2 вид:



Условные обозначения поступательной пары на схеме

Рисунок 12 – Схема кинематической пары V -го класса 2-го вида

Осуществление заданного относительного движения введением звеньев в

КП так, чтобы один элемент пары находился в непосредственном контакте с другим элементом, в некоторых случаях неудобен с точки зрения конструктивной целесообразности. Соединяя во вращательную пару два звена, мы часто вводим как промежуточное звено шарикоподшипник с целью уменьшения трения в паре. Так мы получаем соединение, которое, строго говоря, не представляет собой КП, так как имеет в своем составе ряд подвижных звеньев.

Нетрудно увидеть, что если отнести шарикоподшипник к одному из сочленяемых основных звеньев пары, то относительное

движение звеньев пары не изменится. Таким образом, это соединение будет парой V класса.

При рассмотрении возможных движений, которыми обладают звенья пар в их относительном движении необходимо иметь в виду, что эти движения должны рассматриваться лишь как возможные для данного момента времени.

Рассмотренные КП относились к парам, для которых мгновенные возможные движения их звеньев не зависят друг от друга.

В технике встречаются КП, для которых относительные движения их звеньев связываются какой-либо дополнительной геометрической зависимостью.

В качестве примера рассмотрим случай такой КП, наиболее часто встречающейся в механизмах.

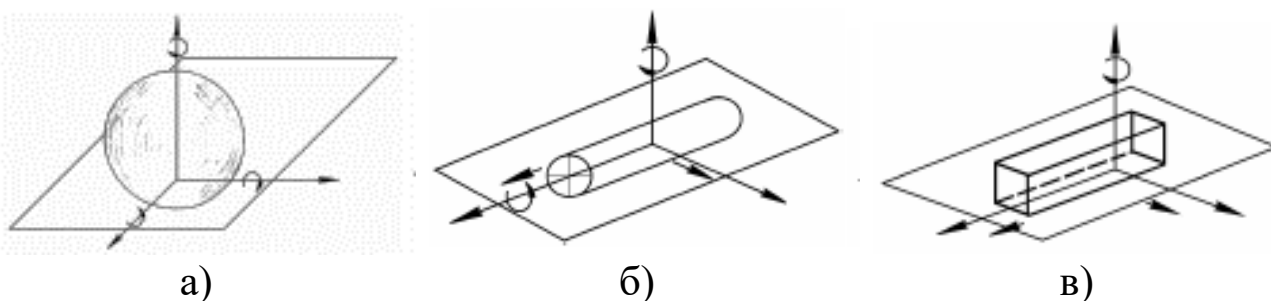
Предположим, что определенному углу поворота (φ) одного звена соответствует определенное поступательное движение (S) вдоль той же оси. Здесь дополнительная связь $S = f(\varphi)$. Эта пара является КП V класса и носит название **винтовой пары**.

По виду **кинематического элемента (КЭ)** КП делятся на низшие и высшие.

Низшими КП называются пары, в которых соприкосновение элементов КП происходит по *поверхности*.

Высшими КП называют пары, в которых соприкосновение элементов КП происходит по *линии* или *точке*.

Для постоянного соприкосновения элементов в паре они должны быть замкнуты. Замыкание КП может быть кинематическим или силовым (рисунок 13).



- а) – высшая КП – контакт по точке, б) – высшая КП – контакт по линии,
в) – низшая КП – контакт по поверхности.

Рисунок 13 – Классификация кинематических пар

Кинематическое замыкание реализуется конструктивной формой элементов, входящих в пару.

Силовое замыкание реализуется использованием силы веса, упругости замыкающей пружины и т. д.

1. 1 Свойства низших кинематических пар

Свойство 1. У низших КП относительные траектории совпадающих точек звеньев, входящих в пару, тождественны, т.е. низшие пары обладают обратимостью движения, т. е. вид траектории в относительном движении не зависит от того, какое из звеньев принято за неподвижное. Во вращательной КП траектория – окружности одинаковых радиусов (рисунок 14) независимо от того, какое из звеньев вращается (1 или 2).

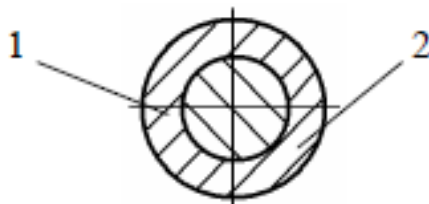


Рисунок 14 – Сечение кинематической пары

В поступательной паре – совпадение отрезков контактных прямых, в винтовой паре – совпадение винтовых линий.

Свойство 2. Давление между поверхностями у низших КП распределяется по площадям конечных размеров и, поэтому удельное давление, а, следовательно, и поверхностный износ звеньев оказывается сравнительно меньше, чем у высших пар.

Свойство 3. Низшие пары просты и относительно дешевы в изготовлении.

Свойство 4. Синтез механизмов с низшими парами до настоящего времени в общем виде не решен.

Свойство 5. Трение в низших КП представляет собой трение скольжения и потери на трение достигают значительной величины.

Свойство 6. Поверхности соприкосновения низших КП должны быть такой формы, чтобы звенья могли перемещаться друг относительно друга без нарушения их контакта. Однако существуют только 3 формы поверхностей, при которых они могут перемещаться одна относительно другой:

- цилиндрические поверхности могут скользить одна по другой вдоль их образующей;
 - поверхности вращения могут вращаться вокруг их общей оси симметрии;
 - винтовые поверхности могут перемещаться одна по другой.
- Отсюда следует, что низшие пары могут быть только 3-х типов: поступательными, вращательными и винтовыми.

1.2 Свойства высших кинематических пар

Свойство 1. Траектории совпадающих точек звеньев в высших парах, как правило, различны, т. е. высшие пары не обладают свойством обратимости движения (вид траектории в относительном движении зависит от того, какое из звеньев принято за неподвижное).

Например,

- траекторией точки В, принадлежащей толкателю, (рисунок 15) в движении относительно кулачковой шайбы является профиль этой шайбы; траекторией же точки, принадлежащей шайбе, является некоторая кривая, проходящая через точку В.

- если взять колесо на рельсе, то вместе они представляют собой высшую КП (рисунок 16а). Точка А колеса при качении по рельсу без проскальзывания опишет циклоиду (рисунки 16 б, в, г, д); та же точка А, принадлежащая рельсу, при его обкатывании без проскальзывания по колесу опишет эвольвенту круга.

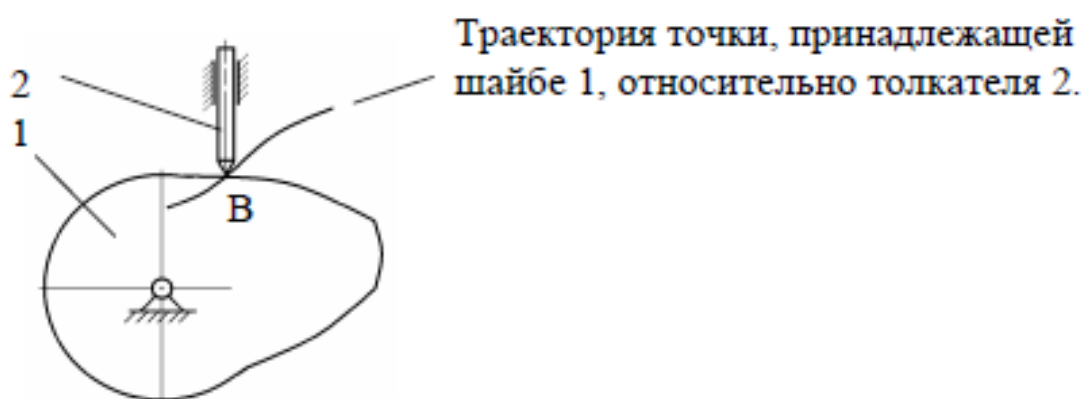
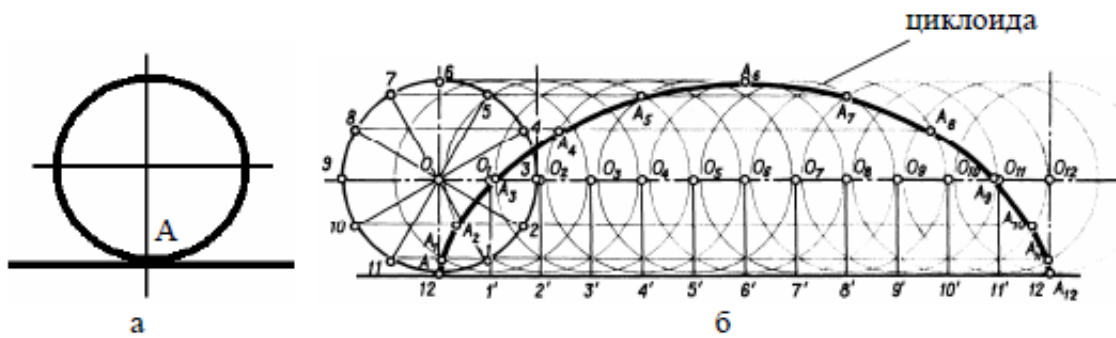


Рисунок 15 – Траектория точки В



эвольвента круга

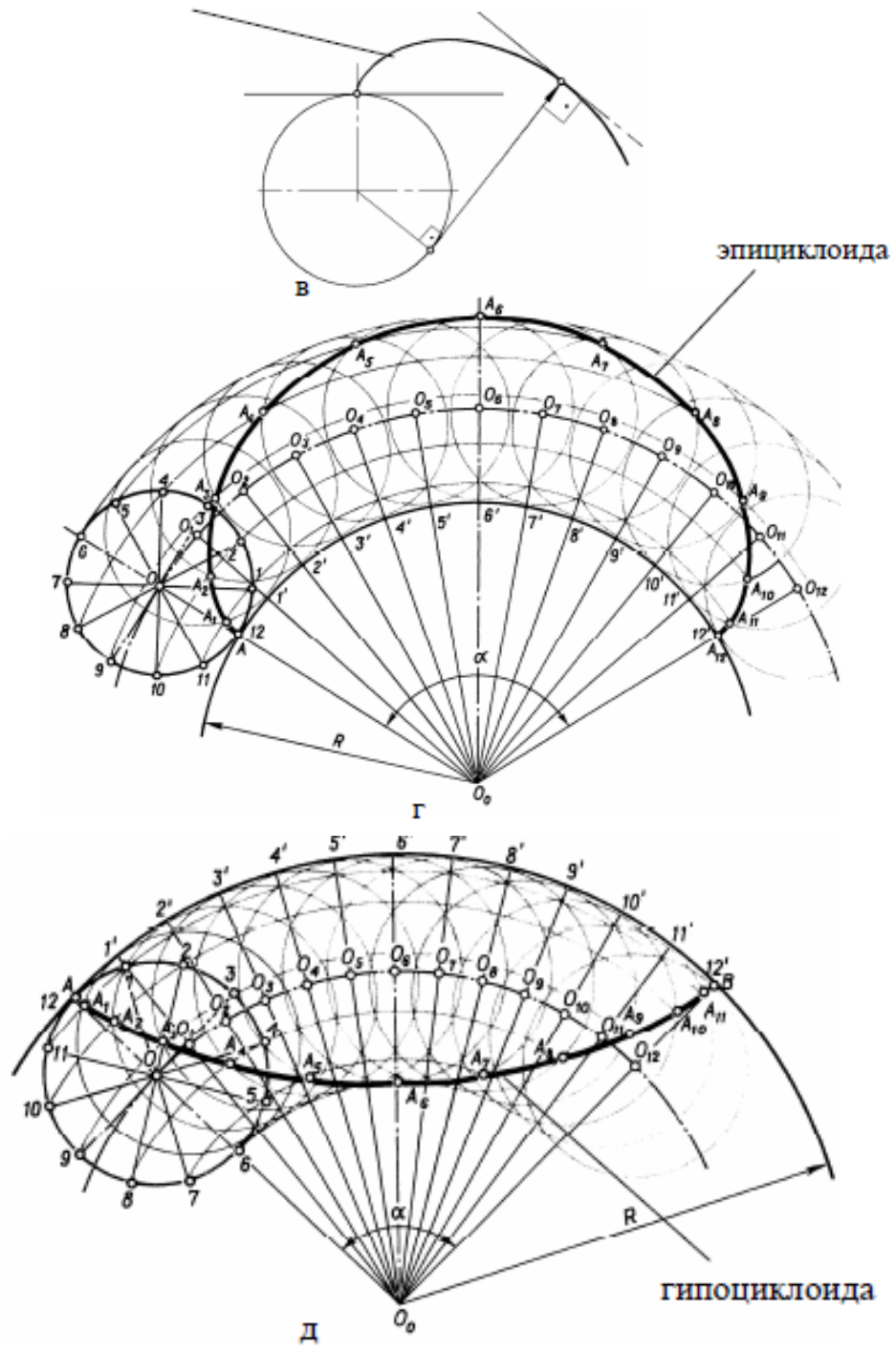


Рисунок 16 – Траектория точки А

При обкатывании колеса без проскальзывания по выпуклой кривой точка А (рисунок 16) колеса опишет эпициклоиду; по вогнутой кривой – гипоциклоиду.

Свойство 2. Износ в высших КП очень велик. Соприкосновение по точкам или линиям ведет к теоретически бесконечно большим удельным давлениям в точках контакта элементов пары.

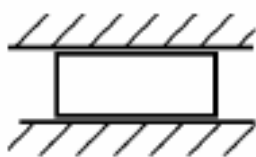
Свойство 3. Высшие пары сложны и дороги в изготовлении.

Свойство 4. Повышенный износ поверхностей соприкосновения влечет за собой изменение геометрических характеристик деталей механизмов. Это в свою очередь вызывает изменение характера траекторий относительного движения звеньев. В качестве компенсации необходимо применять методы поверхностного упрочнения элементов КП (азотирование, цементация, закалка и т.д.), что также вызывает удорожание их изготовления.

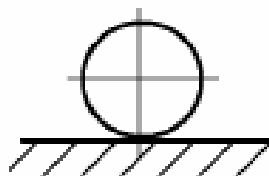
Свойство 5. Трение в высших КП меньше, чем в низших (здесь преимущественно трение качения).

Свойство 6. Высшие КП могут осуществлять более разнообразные виды относительных движений.

По виду связи КП делятся на *удерживающие* и *неудерживающие* (рисунок 17). Для работы КП с неудерживающей связью требуется ее силовое замыкание.



а – удерживающая КП



б – неудерживающая КП

Рисунок 17 – Классификация КП по виду связи

По виду относительного движения КП делятся на *плоские* и *пространственные*. При плоских КП все точки звеньев перемещаются в одной или параллельных (за счет толщины звеньев) плоскостях. При пространственных КП – в пространстве.

Форма элементов КП и их конструктивное оформление играет большую роль в конструировании машин. В первую очередь возникает вопрос о связи формы элементов пар с их прочностью и износостойкостью. По этим характеристикам предпочтительно применение низших КП.

Высшие КП имеют свои значительные достоинства. Использование не только низших, но и высших КП в большинстве случаев упрощает конструкции механизмов, уменьшает их габариты, позволяет осуществить требуемое движение с меньшим количеством звеньев и т. д.

Во многих современных быстроходных машинах широко применяются и, очевидно, будут применяться такие механизмы с высшими парами, как кулачковые, мальтийские кресты, цевочные и иные.

2 Кинематическая цепь. Структурная формула кинематической цепи

Структура механизма определяется его кинематической цепью. Кинематическая цепь — это система звеньев, образующих между собой кинематические пары. Кинематические цепи различают по следующим признакам (рисунок 18).

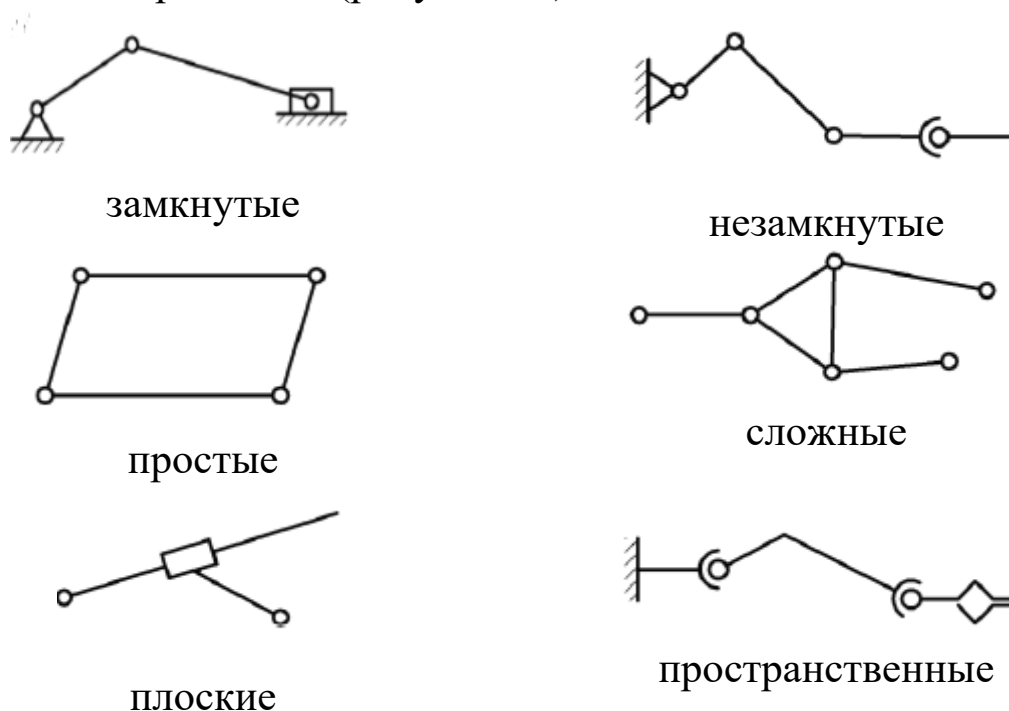


Рисунок 18 – Классификация КП по признакам

В замкнутой цепи каждое звено входит не менее чем в две кинематические пары.

В незамкнутой цепи есть звенья, входящие только в одну кинематическую пару.

В простой цепи каждое звено входит не более чем в две кинематические пары.

В сложной цепи есть звенья, входящие более чем в две кинематические пары.

В плоской цепи все звенья перемещаются в одной, плоскости, либо в параллельных плоскостях.

В пространственной – звенья движутся в разных, непараллельных плоскостях.

Кинематическая цепь характеризуется числом степеней свободы, равным числу входных звеньев.

Основное отличие манипуляторов ПР от других механизмов состоит в том, что их механизмы представляют собой незамкнутые кинематические цепи, которые имеют широкий диапазон пространственных движений рабочих органов. Первые конструкции манипуляторов даже по внешнему виду напоминали руку человека и предназначались для работы с радиоактивными, химически вредными веществами, для работы в вакууме и прочих опасных или недоступных для человека средах.

3 Пространственные системы координат перемещения схвата манипулятора робота

Трем степеням подвижности (свободам движения) устройства позиционирования механической руки – схвата манипулятора соответствуют три обобщенные координаты. В зависимости от выбора этих координат различают устройства манипуляторов с прямоугольной, цилиндрической, сферической или угловой координатными системами.

В прямоугольной системе координат точка схвата перемещается вдоль осей X , Y , Z . В цилиндрической системе координат – вдоль радиус-вектора R , управляемого углом его поворота φ в одной из плоскостей системы координат X , Y , Z . В сферической системе координат – вдоль радиус-вектора R , управляемого углом его поворота φ в одной из плоскостей системы координат X , Y , Z и углом его поворота γ в другой плоскости той же системы координат.

При позиционировании в прямоугольных координатах хват не меняет своей ориентации. В цилиндрической и сферической координатных системах, где это происходит, добавляются кинематические пары, компенсирующие повороты хвата. Дополнительные пары, работающие в своей системе координат, действуют в обратном направлении по отношению к соответствующим кинематическим парам в основной координатной системе. Компенсирующие пары всегда того же типа, что и их «антиподы» (вращение – вращение и т. д.).

Под *рабочим пространством (рабочей зоной)* манипулятора понимаются пределы, в которых возможно управляемое перемещение исполнительного органа (схвата). У манипуляторов различают четыре основные исполнения.

Исполнение II с прямоугольной (декартовой) системой координат. Рабочее пространство выходного звена – *параллелепипед*. Кинематическая схема и конструкция такого манипулятора представлена на рисунке 19.

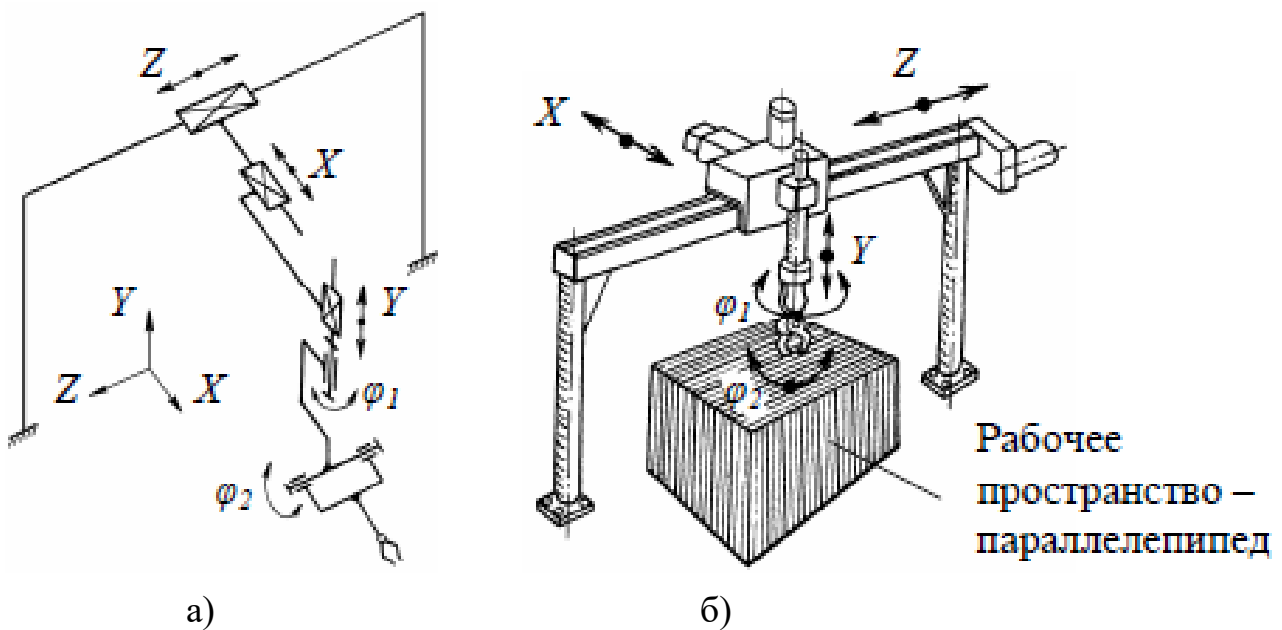


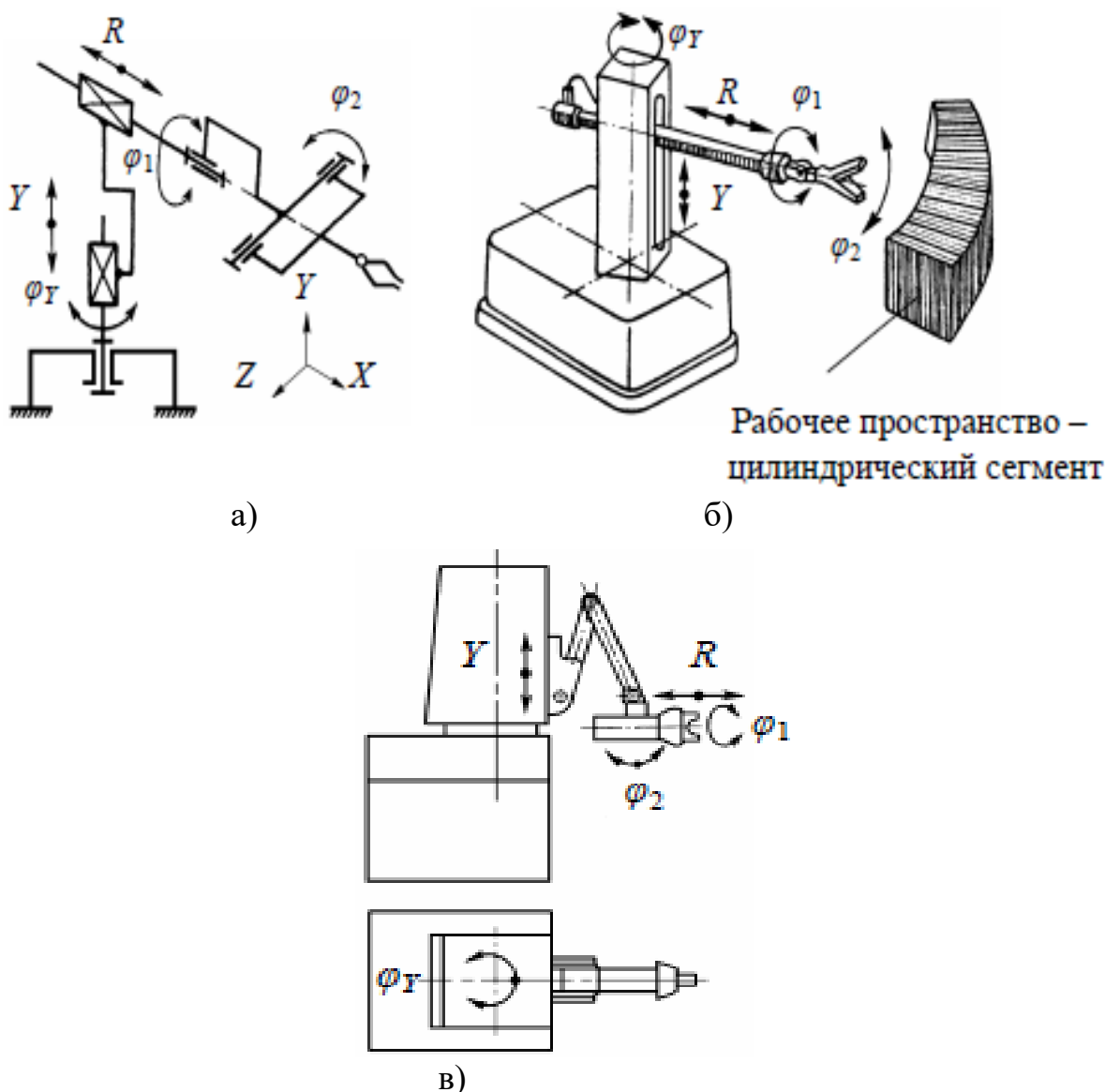
Рисунок 19 – Кинематическая схема и конструкция манипулятора с прямоугольной системой координат

Для позиционирования схвата используют три поступательные движения, для ориентирования – два вращения. Манипуляторы исполнения II нашли преимущественное применение на

технологических операциях, в частности – на сборке, при обслуживании автоматических линий, обеспечивая точное прямолинейное движение детали. __

Недостаток исполнения II – чрезмерные габариты устройства. Кроме этого, при последовательном перемещении детали по трем координатным осям несколько увеличивается общее время выполнения операции.

Исполнение Ц с цилиндрической системой координат. Рабочее пространство выходного звена – **цилиндрический сегмент** или полый цилиндр. Кинематическая схема и конструкция такого манипулятора представлена на рисунке 20.



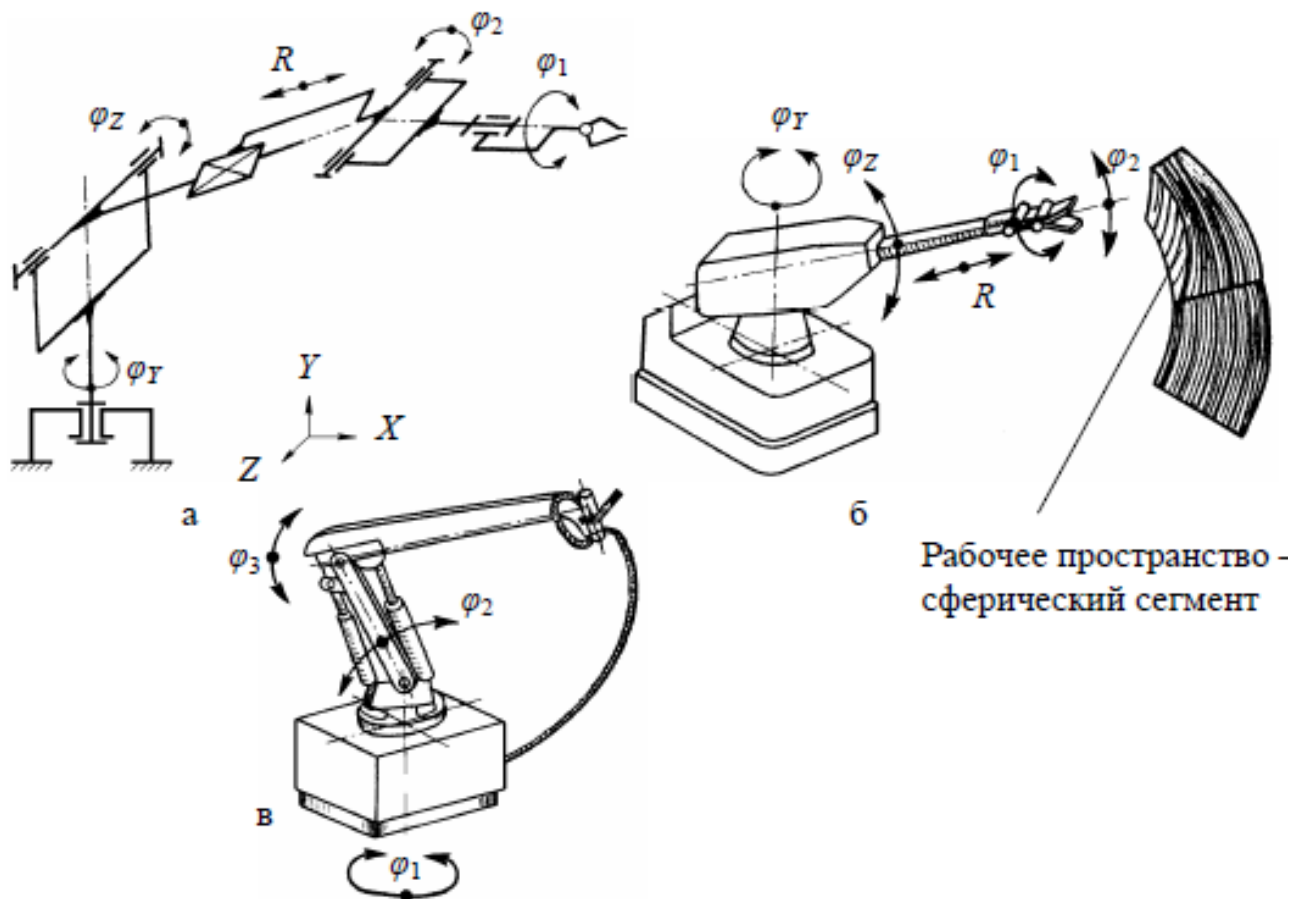
а – кинематическая схема; б, в – конструктивные исполнения

Рисунок 20 – Кинематическая схема и конструкция манипулятора с цилиндрической системой координат

Среди промышленных роботов, предназначенных для выполнения многократно повторяющихся операций, данная схема нашла наибольшее применение. В конструкциях таких манипуляторов для позиционирования схвата используются два поступательных и одно вращательное движения, для ориентирования – два вращения. Их программирование максимально упрощено.

Недостаток исполнения Ц – затрудненность обслуживания при обработке деталей, расположенных на небольшой высоте – уменьшена рабочая зона манипулятора.

Исполнение С со сферической (полярной) системой координат. Рабочее пространство выходного звена – *сферический сегмент*. Кинематическая схема и конструкция такого манипулятора представлена на рисунке 21.



а) – кинематическая схема; б), в) – конструктивные исполнения

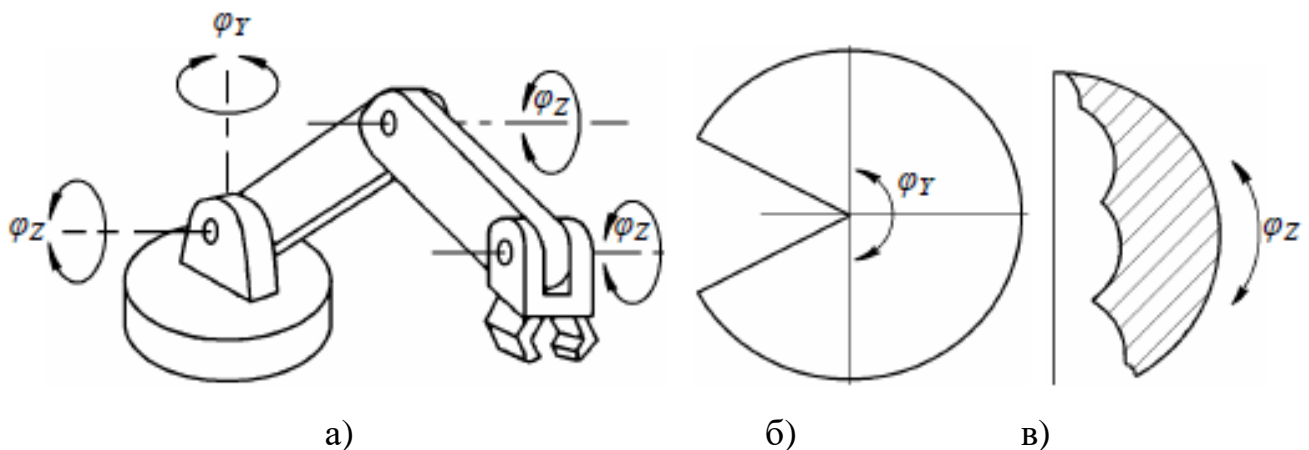
Рисунок 21 – Кинематическая схема и конструкция манипулятора со сферической (полярной) системой координат

Для позиционирования схвата предусмотрены одно поступательное движение и два вращения; для его ориентирования –

два вращения. Такие исполнения манипуляторов применяются преимущественно на операциях, не требующих большой точности отработки движений схвата – при окраске, нанесении защитных покрытий и т. д. Используемые схемы сочетают компактность и повышенную жесткость, допуская значительные динамические нагрузки. Манипуляторы с этой системой координат, как правило, сложнее, чем исполнение Ц, однако они в сравнении с исполнением Ц более компактны.

Все конструкции (рисунок 21) до схвата имеют пять степеней подвижности; вместе с движением схватывания рука имеет шесть подвижностей.

В настоящее время появилось большое количество новых схем, различным образом реализующих разнообразные движения. В частности, это шарнирные (антропоморфные) манипуляторы *исполнения У* с угловой (ангулярной) системой координат (рисунок 22 а). Их рабочее пространство в плане – полный цилиндр (рисунок 22 б), на виде сбоку – составной сегмент (рисунок 22 в) Они имеют только вращательные кинематические пары; по схеме напоминают руку человека. Благодаря возможности складываться, обладают наибольшей компактностью, способны обходить препятствия, однако наиболее сложны в управлении.



а – кинематическая схема; б – рабочее пространство в плане;
в – рабочее пространство на виде сбоку

Рисунок 22 – Кинематическая схема и конструкция манипулятора с угловой (ангулярной) системой координат

На практике манипуляторы реальных роботов обладают избыточностью числа степеней подвижности и в них чаще всего реализуются различные комбинации упомянутых основных типов исполнений.

При построении структуры цепи манипулятора следует иметь в виду следующее – перемещение объекта из одного положения в другое целесообразно разделить на операцию переноса и операцию ориентирования захвата. Кинематическая цепь переносных движений может содержать как вращательные, так и поступательные пары, механизм ориентирующих движений – только вращательные пары.

Вопрос о выборе структуры кинематической цепи переносных движений для конкретного робота является сложным и определяется требованиями технологического процесса, для которого предназначен данный механизм.

Так, при выборе схемы следует иметь в виду, что кинематические цепи, содержащие только поступательные пары, обеспечивают независимость кинематических ошибок от положения объекта в рабочем пространстве. Манипуляторы, кинематическая цепь которых содержит одну вращательную и две поступательные пары типа $B \perp P \perp P$ (оси кинематических пар расположены перпендикулярно) целесообразно использовать с применением пневмопривода или гидропривода, но они обладают малой жесткостью в вертикальном направлении.

Роботы, построенные по структурной схеме, содержащей только вращательные пары типа $B \perp B \parallel B$ (перпендикулярное и параллельное расположение осей вращения), обладают большей компактностью и имеют меньшую зависимость кинематической ошибки от положения звеньев манипулятора.

Размеры звеньев, виды кинематических пар и их взаимное расположение определяют важнейшие технические параметры манипуляторов:

- маневренность;
- рабочий объем;
- зону обслуживания;
- коэффициент сервиса.

4 Маневренность манипулятора робота

В процессе выполнения различных операций с перемещением объектов наиболее часто манипуляторы имитируют движение рук человека. По этой причине структурная схема манипулятора должна обладать кинематическими характеристиками, аналогичными характеристикам рук человека.

Подвижности, имеющиеся у руки человека (без учета подвижности пальцев), можно обеспечить с помощью пространственной цепи, приведенной на рисунке 23.

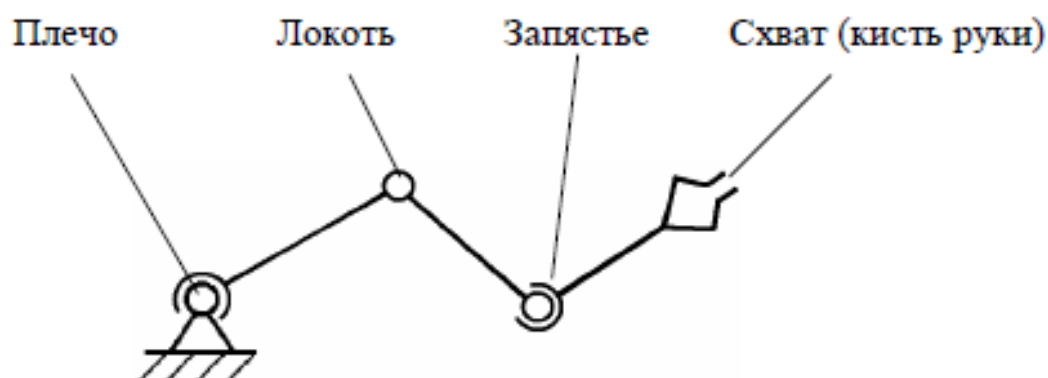


Рисунок 23 – Кинематическая схема робота манипулятора

Рука имеет в плече и в запястье сферические вращательные пары III класса (сферические шарниры), в локте – вращательную пару V класса (плоский шарнир). Используя для оценки степени подвижности руки человека формулу Сомова-Малышева, без учета движения кисти (фаланг и пальцев руки), получим $W = 7$; а с учетом всех звеньев и в самой кисти получим $W = 27$.

Опыт работы с неориентированными объектами показывает, что манипулятор должен иметь, по крайней мере, не менее 7 степеней подвижности. Три степени необходимы для перемещения инструмента в любую точку зоны обслуживания, еще три – для ориентации инструмента, например, электрододержателя, краскопульты и т. д. И, как минимум, одна степень свободы должна быть у схвата.

Каждая степень подвижности управляется индивидуальным приводом, в результате чего исполнительный орган (схват) получает вполне определенное направленное движение.

Напомним, что основное предназначение манипулятора – замена физических функций руки человека при выполнении монотонных,

опасных и вредных работ. Все движения манипулятора условно разделим на три основные группы движений:

- глобальные;
- региональные;
- локальные.

Глобальные движения реализуются путем перемещения подвижного основания манипулятора. В стационарных установках глобальные движения отсутствуют.

Региональные движения – перемещения схвата манипулятора в различные зоны рабочего пространства, определяемого размерами звеньев механизма.

Локальные движения – перемещения схвата манипулятора, соизмеримые с его размерами (ориентация в малой зоне рабочего пространства).

Иногда глобальные и региональные движения называют **транспортирующими**, а локальные – **ориентирующими**.

Возможность совершать независимые движения по шести координатам принципиально обеспечивает минимально необходимые для промышленного робота манипуляции. Увеличение числа степеней подвижности свыше шести придает манипулятору ценное свойство **маневренности**.

Избыточные степени подвижности позволяют выбирать наиболее удобный вариант движения (манипуляция при наличии препятствий). Это свойство характерно для узко специализированных манипуляторов. В промышленных конструкциях увеличение числа управляемых координат связано со значительным усложнением всей конструкции, ведет к возрастанию ее стоимости и понижению точности позиционирования. Большинство универсальных манипуляторов имеют пять-шесть степеней подвижности и маневренность, равную нулю.

Маневренность зависит от количества подвижных звеньев механизма, количества и класса применяемых кинематических пар и их расположения в кинематической цепочке.

Конструктивно наиболее просто осуществить привод вращательных пар V класса. Кинематические цепи с парами I – IV классов можно заменить эквивалентными им цепями ($W = const$) с парами только V класса. При этом, однако, существенно увеличивается общее число звеньев цепи (рисунок 24).

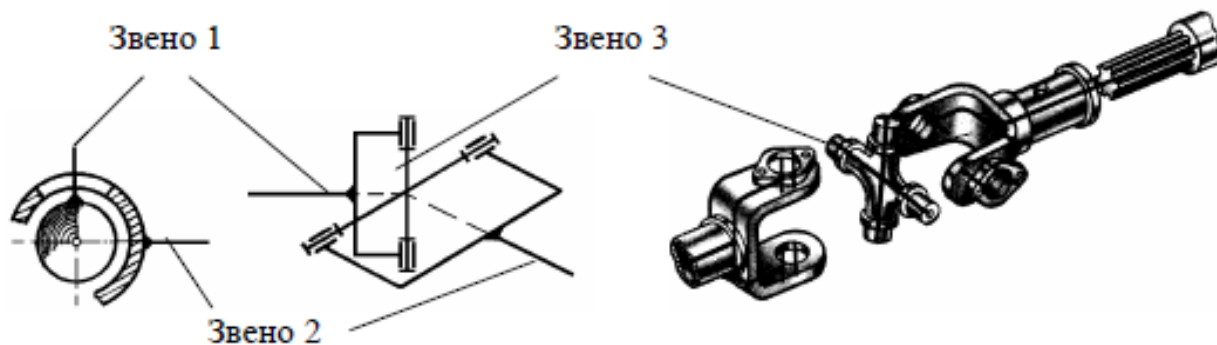


Рисунок 24 – Сферический шарнир с пальцем (p_4) и его конструктивные исполнения

Кинематическую схему механизма, содержащую только пары V класса, иногда называют *основной схемой*, а имеющую высшие пары – *эквивалентной*.

И так, известно *обобщенными координатами механизма* называются независимые между собой параметры (линейные или угловые), однозначно определяющие положение всех звеньев механизма относительно стойки.

Число обобщенных координат называется *числом степеней свободы* или *подвижностью* механизма. Из определения механизма следует, что его подвижность не может быть меньше 1. В качестве обобщенных координат механизма обычно принимают относительные перемещения звеньев, образующих входные пары.

Число W степеней свободы (подвижность) механизма определяется в общем случае по формуле:

$$W = 6n - S, \quad (2)$$

где $n = m - 1$ – число подвижных звеньев механизма;

m – общее число звеньев механизма (включая стойку);

S – общее число связей, накладываемых КП механизма на относительное движение его звеньев.

Число S связей определяется числом и классом КП и находится по формуле:

$$S = 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1, \quad (3)$$

где p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 – число КП соответственно 5-го, 4-го, 3-го, 2-го и 1-го классов.

Для незамкнутой кинематической цепи число связей

$$S = \sum_{i=1}^5 p_i(6 - i).$$

В случае избыточных или пассивных связей число уравнений связей уменьшается:

$$S = \sum_{i=1}^5 ip_i - q,$$

где q – число избыточных связей, а число степеней подвижностей механизма определяется по формуле

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + q.$$

При известном числе степеней свободы можно из последней формулы найти число избыточных связей:

$$q = W - 6n + \sum_{i=1}^5 ip_i.$$

В манипуляторах избыточные связи могут появиться, например, при проектировании передаточного механизма для осуществления движения в шарнире основного механизма.

О.Г. Озол предложил формулу определения числа избыточных связей для многоконтурных механизмов

$$q = W + 6k - f_{\text{кп}},$$

где k – число независимых контуров в механизме, отличающихся от других контуров по крайней мере одним звеном или кинематической парой;

$f_{\text{кп}}$ – сумма подвижностей кинематических пар.

Подставляя выражение (2) в (1), получим **структурную формулу Сомова-Малышева**:

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

Структурная формула (3) применяется для пространственных механизмов. Но ее можно применять и для плоских и сферических механизмов, если последние рассматривать как трехмерные объекты.

Однако плоские и сферические механизмы рассматривают обычно в двумерном пространстве, т.к. все звенья плоского механизма – это плоские фигуры, движущиеся в одной и той же неподвижной плоскости, а все звенья сферического механизма – это сферические фигуры, движущиеся по неподвижной сферической поверхности. При таком способе рассмотрения плоских и сферических механизмов структурная формула для них видоизменяется и принимает следующий вид:

$$W_{\text{хоу}} = 3n - 2p_5 - p_4. \quad (5)$$

Формула (4) называется **формулой Чебышева**, которую можно использовать для расчета базовой маневренности.

Различают **пространственную** (общую) M и **базовую** M_6 маневренности.

Под **пространственной (общей)** маневренностью манипулятора понимается число степеней подвижности при неподвижном (зажатом) схвате:

$$M = 6(n - 1) - W = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1. \quad (6)$$

Базовая маневренность будет рассчитываться по формуле:

$$M_6 = 3(n - 1) - W_{\text{хоу}} = 3(n - 1) - 2p_5 - p_4. \quad (7)$$

Профессором О.Г. Озолем предложен сокращенный вариант расчета пространственной и базовой маневренности, что приводит к тому же результату:

$$M = \Sigma f_{\text{кп}} - 6, \quad (8)$$

$$M_6 = \Sigma f_6 - 3, \quad (9)$$

где $\Sigma f_{\text{кп}} = W$ – сумма свобод движения всех кинематических пар, обеспечивающих пространственную ориентацию схвата (общее число степеней свобод W);

$\Sigma f_6 = W_{\text{хоу}}$ – сумма свобод движения кинематических пар, обеспечивающих движение звеньев в базовой плоскости (например, в плоскости YOX) при неподвижном схвате.

Маневренность манипулятора (базовая) определяется таким количеством свобод движения, которое дает возможность манипулировать звеньями в базовой плоскости (например, в плоскости YOX) при жестком соединении губок схвата с неподвижным предметом.

Если $M > 0$ и $M_6 > 0$, причем $M = M_6$ – манипулятор обладает маневренностью только в базовой плоскости и способен на произвольную ориентацию схвата в пространстве в пределах конструктивных параметров схемы.

Если $M > 0$ и $M_6 > 0$, причем $M < M_6$ – манипулятор обладает маневренностью в базовой плоскости, но имеет ограниченную общую маневренность и не способен обеспечить ряд положений схвата в пространстве. В этом случае необходимо изменить ориентацию носителя – основания манипулятора (подвижного и неподвижного).

Если $M > 0$ и $M_6 > 0$, причем $M > M_6$ – манипулятор наиболее универсален, он обладает маневренностью как в базовой плоскости, так и в пространстве и способен работать при неподвижном схвате.

В случае $M \leq 0$ и $M_6 \leq 0$ манипулятор способен выполнить ограниченные перемещения как в плоскости, так и в пространстве, но не способен работать с объектами, кинематически связанными с неподвижной базой, так как схема манипулятора в этом случае теряет всякую подвижность и превращается в жесткую ферму.

Повышенная маневренность увеличивает возможности для выполнения сложных операций с объектом манипулирования

наиболее рациональным путем при наличии препятствий в рабочей зоне, однако усложняет задачу управления таким манипулятором, поскольку приводит к неоднозначному решению задачи движения схвата.

Примечание – Выбор вида и комбинаций кинематических пар привода механической руки является компромиссным решением между различными требованиями, предъявляемыми к манипулятору.

Прямоугольная система координат (рабочая зона – параллелепипед) в устройствах позиционирования применяется в схемах специализированных роботов, выполняющих технологические операции, в частности, сборочные. Здесь существенное значение имеет простота полного движения, представленного его составляющими по координатам.

Наибольшее распространение среди промышленных роботов, созданных для целей транспортировки, получили конструкции в цилиндрических координатных осях (рабочая зона – цилиндрический сегмент).

Сферическая система позиционирования (рабочая зона – сферический сегмент) позволяет сочетать компактность и повышенную жесткость, допускающую высокие динамические нагрузки.

Пример1 Определить число степеней подвижности и маневренность манипулятора промышленного робота по структурной схеме, изображенной на рисунке 25.

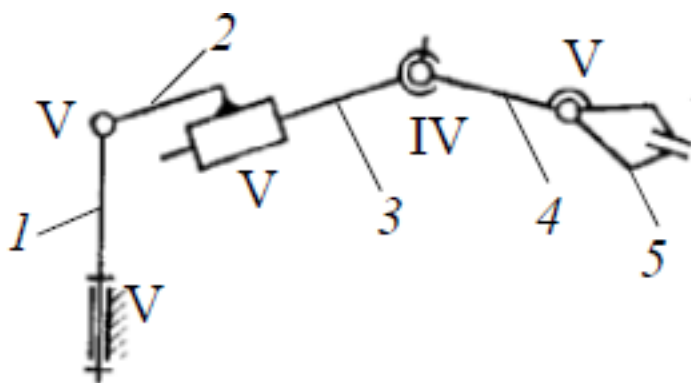


Рисунок 25 – Кинематическая схема манипулятора промышленного робота

У данного манипулятора число подвижных звеньев равно $n=5$. Манипулятор имеет четыре кинематических пары V класса и одну кинематическую пару (шарнир с пальцем) IV класса. Тогда число степеней подвижности согласно (1.3):

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 4 - 4 \cdot 1 = 30 - 20 - 4 = 6.$$

Общую маневренность определим по выражению (1.5):

$$M = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 = 6(5 - 1) - 5 \cdot 4 - 4 \cdot 1 = 24 - 20 - 4 = 0,$$

или

$$M = \Sigma f_{\text{кп}} - 6 = 6 - 6 = 0,$$

т.е. данный манипулятор маневренностью не обладает.

Число степеней подвижности на базовой плоскости (без одного звена $n=4$) определится как для плоского механизма по формуле Чебышева (4):

$$W_{xoy} = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 - 1 \cdot 1 = 12 - 8 - 1 = 3$$

Базовую маневренность определим по формуле:

$$M_6 = 3(n - 1) - W_{xoy} = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 1 \cdot 1 = 9 - 8 - 1 = 0.$$

$$M_6 = \Sigma f_6 - 3 = 3 - 3 = 0.$$

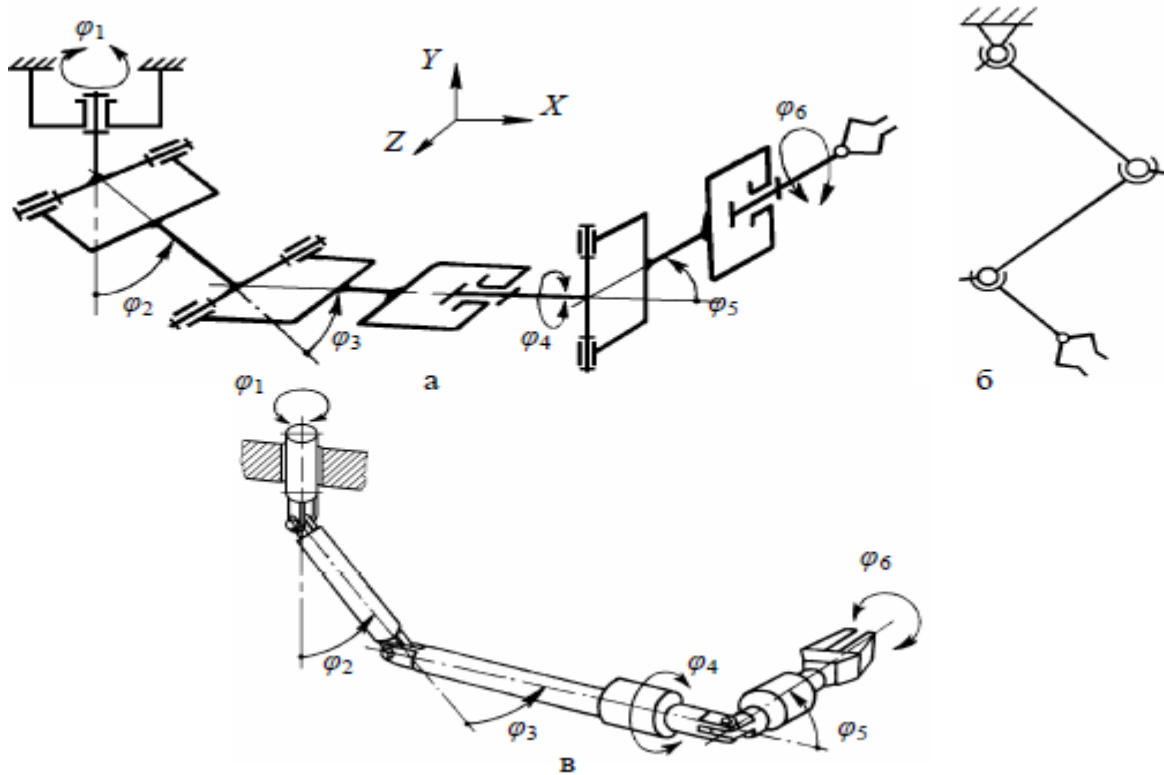
Пример 2 В качестве примера проиллюстрируем основную и эквивалентную схемы механизма манипулятора «Маскот», а также его конструктивное исполнение (рисунок 26).

Для основной схемы число степеней подвижности манипулятора:

$$W = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 6,$$

Число степеней подвижности в базовой плоскости (например, в YOX):

$$W_{xoy} = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 3,$$



а) – основная схема манипулятора «Маскот»; б) – эквивалентная схема, в) – конструктивное исполнение

Рисунок 26 – Манипулятор «Маскот» Маневренность общая:

$$M = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 0.$$

Маневренность в базовой плоскости (например, в YOX)

$$M_{\sigma} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 0$$

или

$$M_{\sigma} = \Sigma f_{\sigma} - 3 = 3 - 3 = 0.$$

Для эквивалентной схемы:

$$W = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 0 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 6,$$

$$M = 6 \cdot 2 - 5 \cdot 0 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 1 \cdot 0 = 0,$$

$$M_{\sigma} = \Sigma f_{\sigma} - 3 = 3 - 3 = 0.$$

Пример 3 На рисунке 27 приведена кинематическая схема манипулятора, содержащая шесть подвижных звеньев, образующих пять кинематических пар пятого класса (три вращательные – O_1 , C , D и две поступательные – A и E) и одну сферическую трехподвижную пару B .

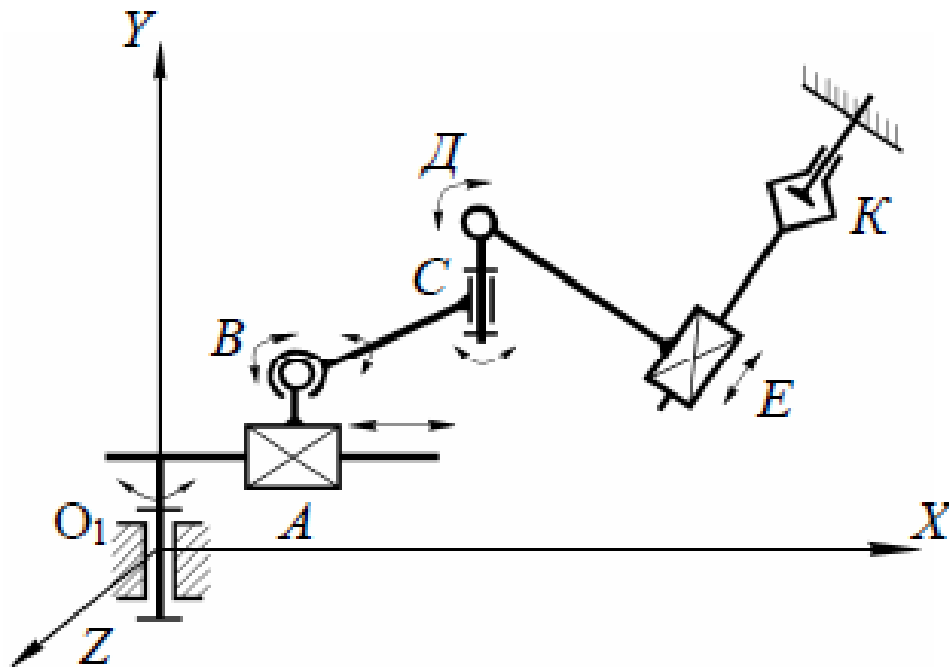


Рисунок 27 – Схема пространственной кинематической цепи манипулятора

1) Для рассматриваемой схемы в пространстве имеем:

$$n = 6, p_5 = 5 \text{ и } p_3 = 1.$$

В этом случае количество свобод движения манипулятора составит:

$$W = 6 \cdot n - 5 \cdot p_5 - 3 \cdot p_3 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 5 - 3 \cdot 1 = 8.$$

2) Маневренность манипулятора в пространстве при неподвижном хвате (количество подвижных звеньев примем равным $n - 1$):

$$M = 6(n - 1) - 5p_5 - 3p_3 = 6(6 - 1) - 5 \cdot 5 - 3 \cdot 1 = 30 - 25 - 3 = 2,$$

или

$$M = \Sigma f_{kn} - 6 = (6 \cdot 6 - 5 \cdot 5 - 3 \cdot 1) - 6 = 8 - 6 = 2.$$

3) Маневренность манипулятора в базовой плоскости (например, в плоскости YO_1X) при неподвижном схвате будет обеспечиваться подвижностью кинематических пар A , D , E и одним из трех вращений сферической пары B .

Для рассматриваемой плоскости YO_1X схемы имеем:

$$n = 4, p_5 = 3 \text{ и } p_3 = 1.$$

В этом случае количество свобод движения манипулятора составит:

$$W_{xoy} = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 = 12 - 8 = 4,$$

$$M_{\bar{6}} = 3(n-1) - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 = 9 - 4 = 5,$$

или

$$M_{\bar{6}} = \Sigma f_{\bar{6}} - 3 = 4 - 3 = 1.$$

4) Исследование структуры манипулятора дает основание сделать вывод о том, что при $M = 2$ и $M_{\bar{6}} = 1$ манипулятор обладает маневренностью в пространстве и способен работать при неподвижном схвате.

Пример 3 Для трехзвенной цепи манипулятора, приведенной на рисунке 28, звенья которого соединены парами третьего (O_1), четвертого (A) и пятого (B) классов, выполним следующие вычисления

$$W = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 6,$$

$$M = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 - 6 = 0,$$

$$W_{xoy} = 6 \cdot 2 - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 12 - 5 - 4 = 3,$$

$$M_{\bar{6}} = 3 - 3 = 0.$$

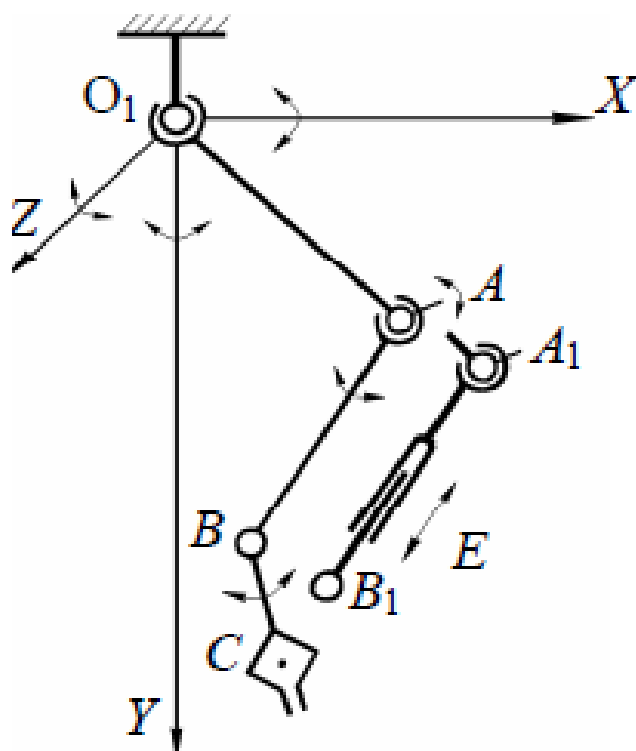


Рисунок 28 – Манипулятор с дополнительными подвижными звеньями

Таким образом, данный манипулятор способен ориентировать хват C в рабочем объеме, но не способен работать с предметами, кинематически связанными с неподвижными объектами.

Введение в цепь звена A_1B_1 переменной длины (дополнительная кинематическая пара E – телескопический разъем со своим приводом) дает возможность повысить маневренность манипулятора, выполнять более сложные движения в ограниченном рабочем объеме, уменьшить энергозатраты при перемещении объекта из одной точки в другую при наличии препятствий в зоне обслуживания. В этом случае:

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 7,$$

$$M = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 - 6 = 1,$$

$$W_{xoy} = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 1 = 4,$$

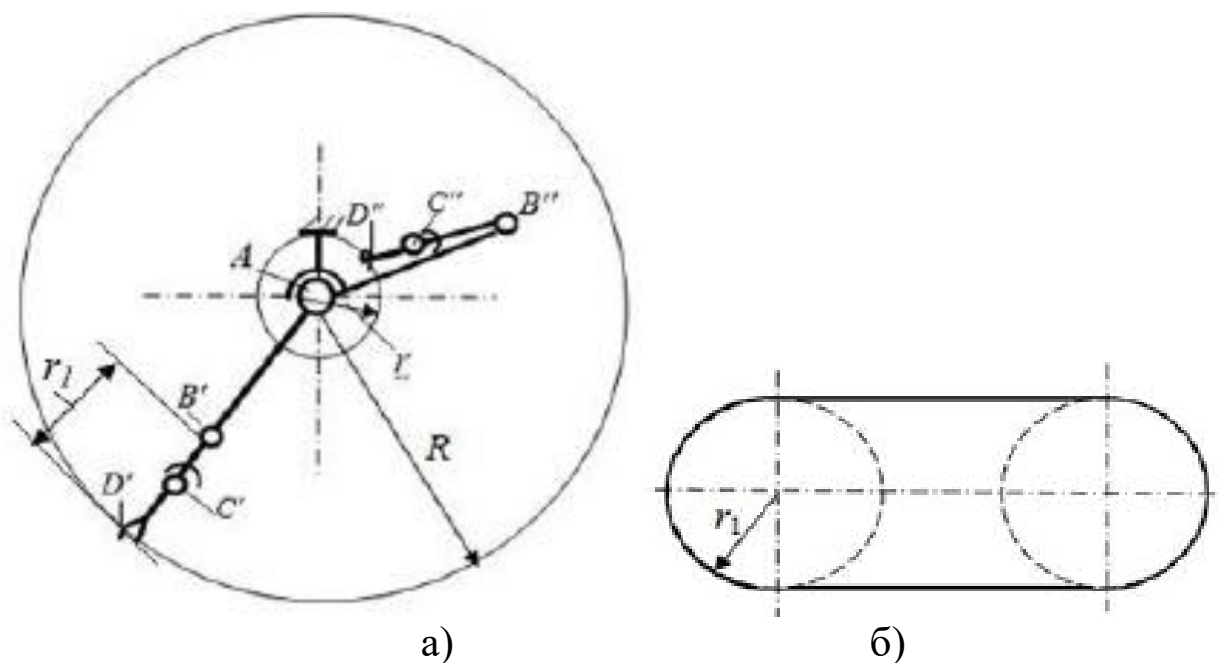
$$M_{\sigma} = 4 - 3 = 1.$$

5 Рабочий объем и зона обслуживания манипулятора работа

Рабочим объемом называют объем, ограниченный поверхностью, огибающей все возможные положения захвата. Например, для механизма, изображенного на рисунке 29 – это сфера радиуса R .

Зона обслуживания – это часть рабочего объема, в которой можно выполнить операции с объектом манипулирования. Для манипулятора, изображенного на рисунке 29а, – это часть пространства между сферами радиуса R и r_1 .

Если центральную сферическую пару заменить вращательной, то зоной обслуживания будет тор (рисунок 29б) с радиусом r_1 .



а) – с центральной сферической парой; б) – с центральной вращательной парой.

Рисунок 29 – Рабочий объем и зона обслуживания манипуляторов

Внутри рабочего объема не все части одинаково удобны для выполнения заданных движений. Поэтому движения захвата подразделяют на 4 класса, которые изображены на рисунке 30:

- а) движение в свободном рабочем объеме;
- б) движение в несвободном объеме, часть которого занята каким-то твердым телом;

в) движение, при котором захват перемещается по плоской или пространственной кривой, т. е. несвободное манипулирование;

г) движение в несвободном пространстве, при несвободном объекте манипулирования (рисунок 30г, 31).

Для обхода препятствий и выполнения сложных операций с объектом манипулирования механизм должен обладать достаточной маневренностью.

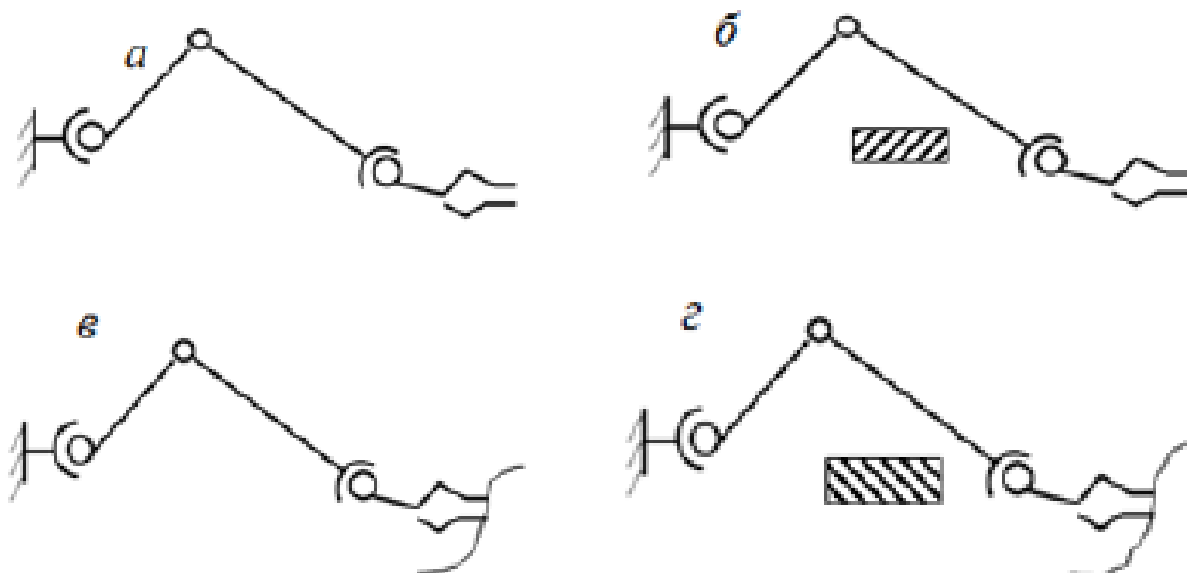
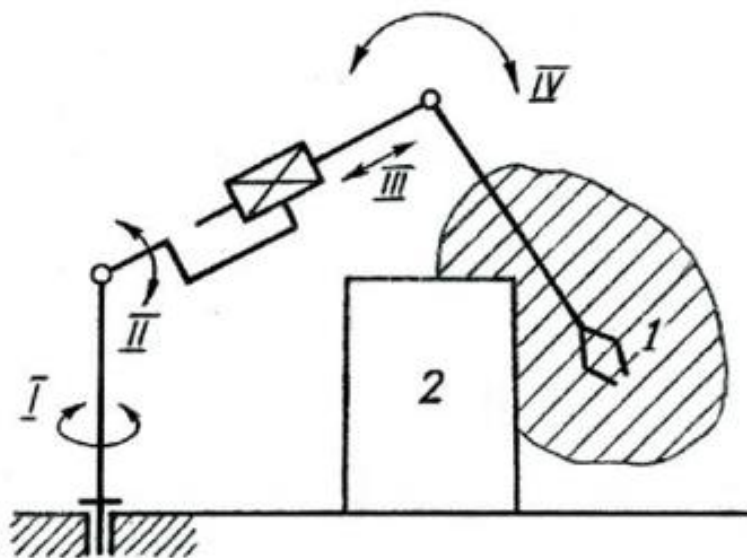


Рисунок 30 – Классификация движения схвата



1 – рабочая зона; 2 – препятствие

Рисунок 31 – Схема манипулятора с « избыточной степенью подвижности» IV

6 Угол сервиса и коэффициент сервиса манипулятора работа

Для каждой точки рабочей зоны можно определить некоторый телесный угол, внутри которого захват может подойти к данной точке. Этот угол называется углом сервиса и обозначается ψ .

Как известно из геометрии, величина телесного угла определяется отношением площади сферы, вырезанной этим углом, к квадрату радиуса сферы. Поэтому максимальное значение угла сервиса:

$$\psi_{\max} = 4\pi R^2 / R^2 = 4\pi \text{ (стерадиан)}.$$

Отношение угла сервиса ψ к его максимальному значению 4π называют коэффициентом сервиса в данной точке θ :

$$\theta = \frac{\psi}{4\pi}. \quad (10)$$

Значение θ может изменяться от нуля для точек на границе рабочего объема, где захват может быть подведен к объекту в единственном направлении, до единицы в точках полного сервиса, где захват можно подвести с любого направления:

$$0 \leq \theta \leq 1.$$

Значения, близкие к единице возможны для точек, близких к центральной части рабочего объема.

Среднее значение коэффициента сервиса в рабочем объеме оценивают интегральным показателем

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{1}{V} \int_V \theta dV \quad (11)$$

где V - рабочий объем манипулятора.

Коэффициент сервиса оценивает геометрическое качество манипулятора, его возможности выполнения различных операций.

Если $\theta=1$, то это значит, что продольная ось захвата может проходить через точку M в любом направлении (так называемый полный сервис для точки M), при $\theta=0$ существует только одно направление (позиция) подхода.

На рисунке 32 изображена кинематическая схема, структура которой описывается как $\text{П}\perp\text{П}\perp\text{П}\parallel\text{В}\perp\text{В}$, обеспечивая три поступательные переносы и две вращательные (ротация и сгиб) степени подвижности. Для этого изобразим сферу радиусом $R=1$ с центром в некоторой неподвижной точке M рабочей зоны. В этой точке расположим и центр захватного устройства.

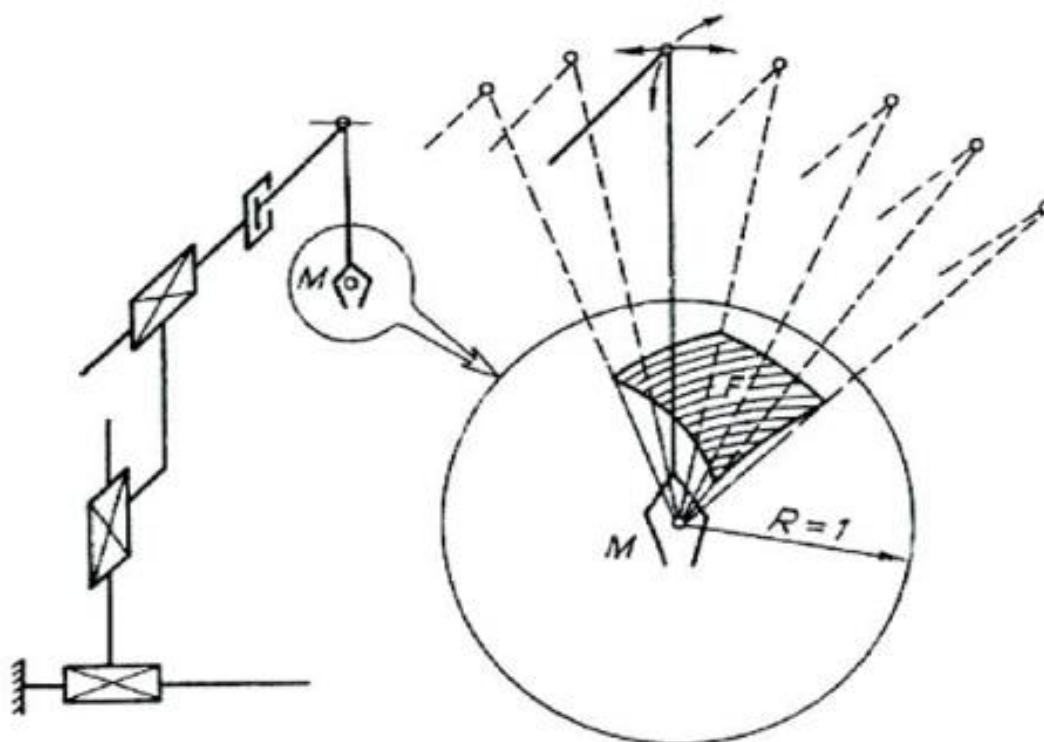


Рисунок 32 – Иллюстрация понятия угла сервиса манипулятора

Осуществив теперь все возможные перемещения звеньев кинематической цепи по степеням подвижности, сохраняя неизменным положение центра захватного устройства, получим совокупность многих положений оси захватного устройства, проходящей в каждом случае через точку M . Все возможные положения этой оси при зафиксированном в точке M центре захватного устройства образуют на поверхности сферы радиусом R площадку F определенной формы и размеров как множество точек пересечения продольной оси захватного устройства и поверхности сферы.

Если полная поверхность сферы радиусом R равна $4\pi R^2$, то площадка F как часть сферической определится в виде θR^2 , где телесный угол $\theta \leq 4\pi$ с центром в точке M , ограниченный границами площадки F , и есть *угол сервиса*, или *пространственный угол обслуживания*. Отношение угла сервиса к телесному углу полной сферы называют *коэффициентом сервиса*.

Для рассмотренной схемы (рисунок 32) значение θ больше нуля, но не может быть равным 1, так как центр захватного устройства невозможно поместить в зону расположения кинематической пары, осуществляющей ротацию звена, смежного с захватным. Значение $\theta = 1$ для многих точек рабочей зоны в принципе достижимо, в особенности для кинематических цепей, работающих в сложной сферической или цилиндрической системах координат, в чем, в частности, заключается их существенное преимущество перед другими кинематическими цепями.

Расчет величины коэффициента сервиса достаточно сложная задача, поскольку ориентировка оси захвата в точке рабочей зоны определяется совокупностью перемещения звеньев кинематической цепи как ориентирующим, так и по переносным степеням подвижности.

Следует заметить, что коэффициент сервиса неодинаков для всех точек рабочей зоны. Так, если для точек, расположенных ближе к центру рабочей зоны, θ может иметь значения, близкие или равные 1, то для точек на внешних границах рабочей зоны он равен нулю, т.е. в таких точках возможна лишь единственная ориентировка оси захватного устройства

6.1 Определение коэффициента сервиса методом объемов

Рассмотрим данный метод на примере манипулятора с двумя сферическими и одной вращательной парами (рисунок 33а).

Пусть заданы длины звеньев l_1, l_2, l_3 ; требуется определить коэффициент сервиса для точки D .

Захват может вращаться вокруг точки D (т. к. объект считаем пренебрежимо малым), в этом случае D – тоже сферическая пара. Тогда угол сервиса θ в точке D определится как телесный угол, заключенный между всеми возможными положениями отрезка CD .

Точки A , B и C (шарнирного четырехзвенника) всегда лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси вращательной пары B .

Этот четырехзвенник может вращаться относительно оси, проходящей через центры сферических пар A и D . Положение плоскости ABC , через которое проходит отрезок CD , называется базовой плоскостью.

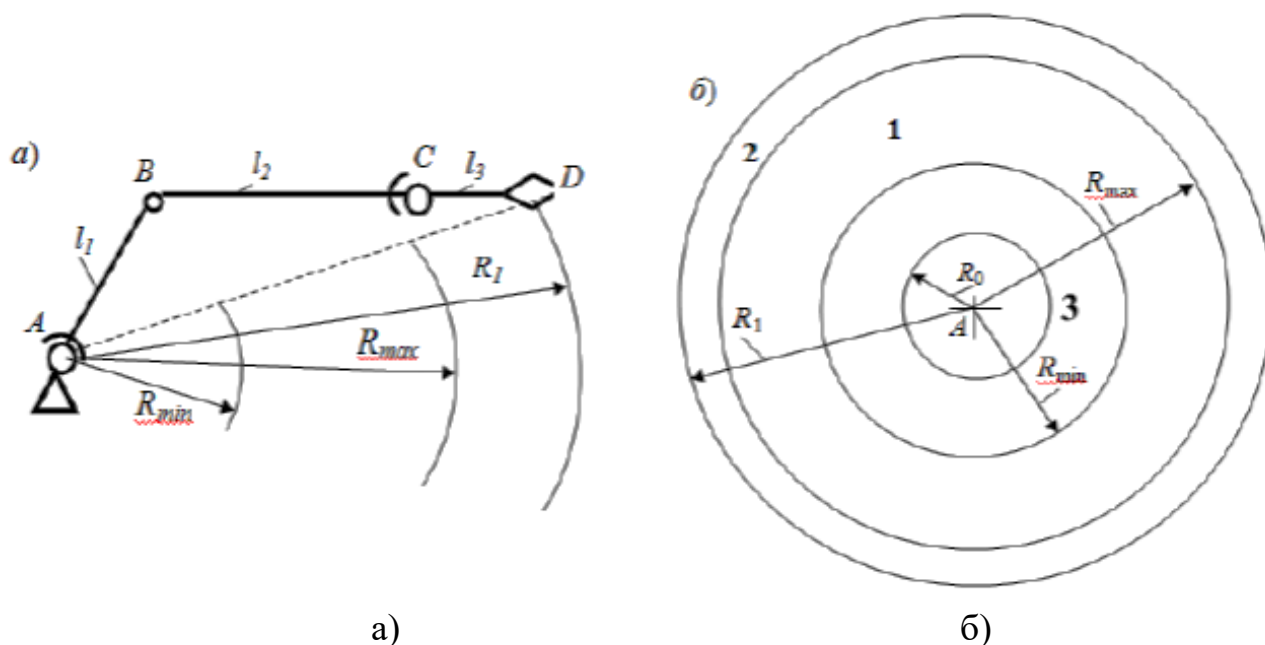


Рисунок 33 – Схема к определению коэффициента сервиса плоского манипулятора.

В базовой плоскости четырехзвенник - плоская фигура, поэтому можно найти положения CD в данной плоскости, а затем вращать весь четырехзвенник относительно оси AD .

Коэффициент сервиса равен единице, если угол сервиса $\psi = 4\pi$, то есть точка C может занять любое положение на сфере с радиусом CD . Это возможно, когда звено CD является кривошипом.

На основании теоремы Грасгофа сумма длин наибольшего и наименьшего звеньев должна быть меньше суммы длин двух других звеньев. Для нашего примера имеется три возможных условия существования кривошипа.

Условие 1:

$$l_3 + R \leq l_1 + l_2;$$

Условие 2:

$$l_3 + l_1 \leq R + l_2;$$

Условие 3:

$$l_3 + l_2 \leq R l_1.$$

Из условия 1 определяем максимальную длину стойки:

$$R_{max} = l_1 + l_2 + l_3. \quad (12)$$

Из условий 2 и 3 определяем минимальную длину стойки:

$$R_{min} = |l_1 - l_2| + l_3. \quad (13)$$

Следовательно, область расположения точки D на базовой плоскости при $\theta = 1$ находится между окружностями радиусов R_{max} и R_{min} с центром в точке A (рисунок 33б).

Если увеличивать длину стойки сверх R_{max} , то CD не совершает полного оборота (условие существования кривошипа не выполняется), и получим двух коромысловый механизм. Таким образом точка C может располагаться лишь на части сферы радиуса CD ($\theta < 1$). Предельное значение, когда звенья вытягиваются в одну линию (зона 2, где $\theta = 0$):

$$R_1 = l_1 + l_2 + l_3. \quad (14)$$

Уменьшать значение R можно до величины (зона 3):

$$R_0 = |l_1 - l_2| - l_3. \quad (15)$$

Эти зоны получены для плоского манипулятора.

Если вращать четырехзвенник вокруг оси AD , то для зоны 1 получим сферу, а для 2-й и 3-й зоны - шаровой сектор. Площадь поверхности шарового сектора (S) радиусом $R = l_3$ определяется по формуле:

$$S = 2\pi l_3^2 (1 - \cos\varphi_{max}). \quad (16)$$

Максимальный угол, на который может повернуться CD , когда звенья AB и BC лежат на одной прямой (рисунок 34), при данном значении длины стойки R , определяется по формуле:

$$\cos\varphi_{max} = \pm \frac{l_3^2 + R^2 - (l_1 \pm l_2)}{2Rl_3}. \quad (17)$$

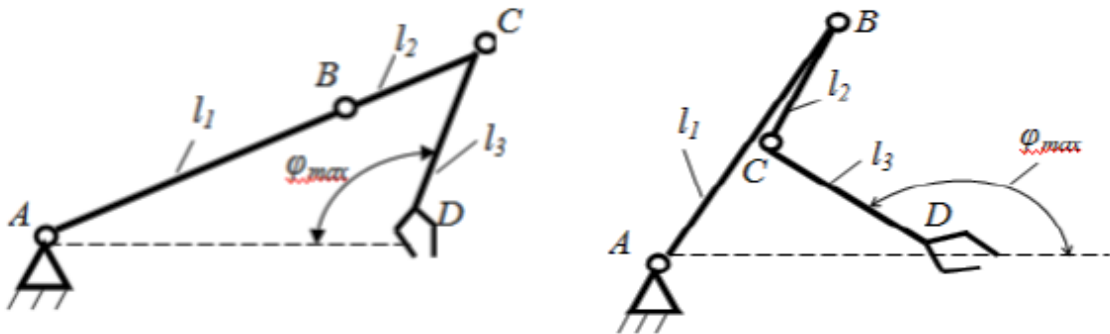


Рисунок 34 – Схема к определению коэффициента сервиса методом объемов

Знак «плюс» - для зоны 2, «минус» - для зоны 3. Для зоны 1 угол:

$$\varphi_{max} = \pi.$$

Из определения телесного угла следует, что угол сервиса равен:

$$\psi = S / l_3^2.$$

Отсюда определяем коэффициент сервиса:

$$\theta = \frac{\psi}{4\pi} = \frac{S}{l_3^2 4\pi} = \frac{l_3^2 2\pi (1 - \cos\varphi_{max})}{l_3^2 4\pi} = \frac{1 - \cos\varphi_{max}}{2}, \quad (18)$$

ИЛИ

$$\theta = \pm \frac{(l_1 \pm l_2)^2 - (R - l_3)^2}{4Rl_3}. \quad (19)$$

7 Структура манипуляторов робота. Геометро-кинематические характеристики

Манипулятор промышленного робота по своему функциональному назначению должен обеспечивать движение выходного звена и закрепленного в нем объекта манипулирования в пространстве по заданной траектории и с заданной ориентацией. Для полного выполнения этого требования основной рычажный механизм манипулятора должен иметь не менее шести подвижностей, причем движение по каждой из них должно быть управляемым. Промышленный робот с шестью подвижностями является сложной автоматической системой. Эта система сложна как в изготовлении, так и в эксплуатации. Поэтому в реальных конструкциях промышленных роботов часто используются механизмы с числом подвижностей менее шести. Наиболее простые манипуляторы имеют три, реже две, подвижности. Такие манипуляторы значительно дешевле в изготовлении и эксплуатации, но предъявляют специфические требования к организации рабочей среды. Эти требования связаны с заданной ориентацией объектов манипулирования относительно механизма робота. Поэтому оборудование должно располагаться относительно такого робота с требуемой ориентацией.

Рассмотрим для примера структурную и функциональную схемы промышленного робота с трехподвижным манипулятором. Основной механизм руки манипулятора состоит из неподвижного звена 0 и трех подвижных звеньев 1, 2 и 3 (рисунок 35). Структурная схема механизма этого манипулятора соответствует цилиндрической системе координат. В этой системе звено 1 может вращаться относительно звена 0 (относительное угловое перемещение φ_{10}), звено 2 перемещается по вертикали относительно звена 1 (относительное линейное перемещение S_{21}) и звено 3 перемещается в горизонтальной плоскости относительно звена 2 (относительное линейное перемещение S_{32}). На конце звена 3 укреплено захватное устройство или схват, предназначенный для захвата и удержания объекта манипулирования при работе манипулятора. Звенья основного рычажного механизма манипулятора образуют между собой три одноподвижные кинематические пары (одну вращательную А и две поступательные В и С) и могут обеспечить перемещение

объекта в пространстве без управления его ориентацией. Для выполнения каждого из трех относительных движений манипулятор должен быть оснащен приводами, которые состоят из двигателей с редуктором и системы датчиков обратной связи. Так как движение объекта осуществляется по заданному закону движения, то в системе должны быть устройства, сохраняющие и задающие программу движения, которые назовем носителями программ. При управлении от ЭВМ такими устройствами могут быть дискеты, диски CD, магнитные ленты и др. Преобразование заданной программы движения в сигналы управления двигателями осуществляется системой управления. Эта система включает ЭВМ, с соответствующим программным обеспечением, цифроаналоговые преобразователи и усилители. Система управления, в соответствии с заданной программой, формирует и выдает на исполнительные устройства приводов (двигатели) управляющие воздействия u_i . При необходимости она корректирует эти воздействия по сигналам Δx_i , которые поступают в нее с датчиков обратной связи.

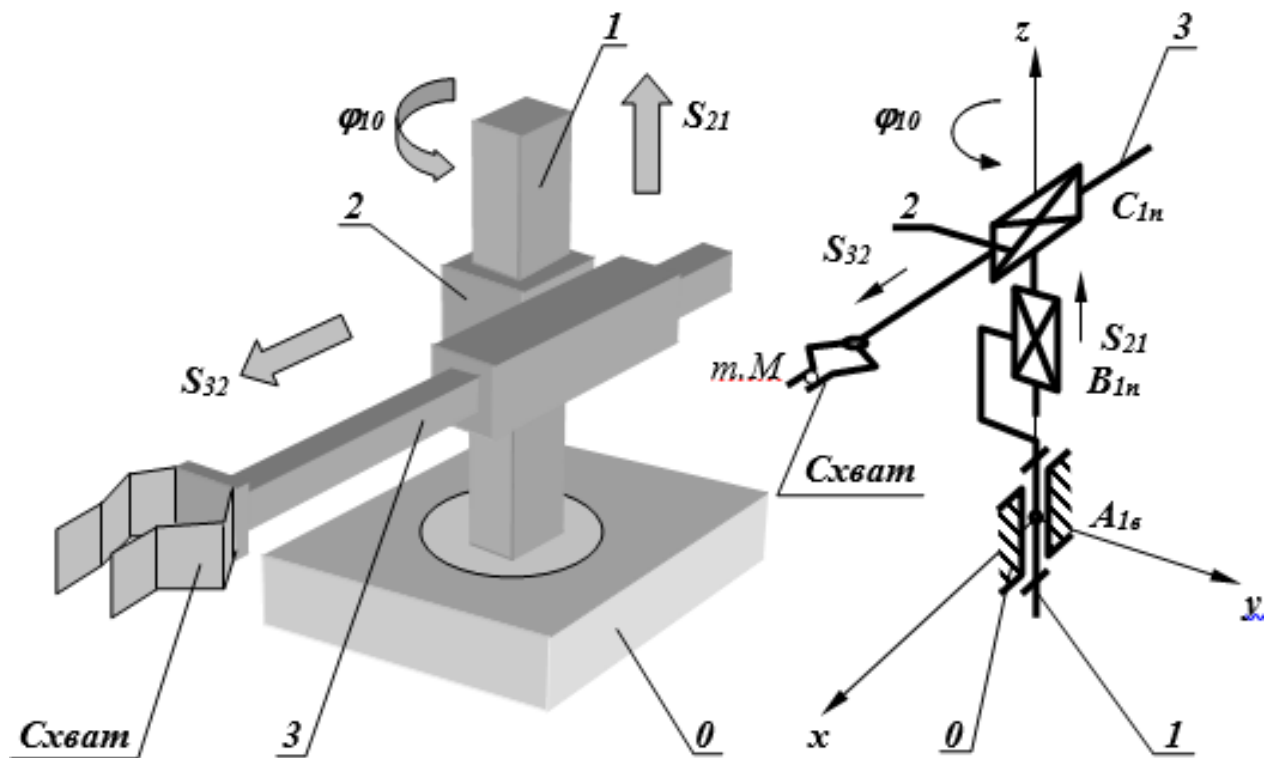


Рисунок 35 – Внешний вид и кинематическая структура робота манипулятора

Формула строения - математическая запись структурной схемы манипулятора, содержащая информацию о числе его подвижностей, виде кинематических пар и их ориентации относительно осей базовой системы координат (системы, связанной с неподвижным звеном).

Движения, которые обеспечиваются манипулятором делятся на:

- **глобальные** (для роботов с подвижным основанием) – движения стойки манипулятора, которые существенно превышают размеры механизма;

- **региональные** (транспортные) – движения, обеспечиваемые первыми тремя звеньями манипулятора или его «рукой», величина которых сопоставима с размерами механизма;

- **локальные** (ориентирующие) – движения, обеспечиваемые звеньями манипулятора, которые образуют его «кисть», величина которых значительно меньше размеров механизма.

Функциональная схема промышленного робота манипулятора представлена на рисунке 36.

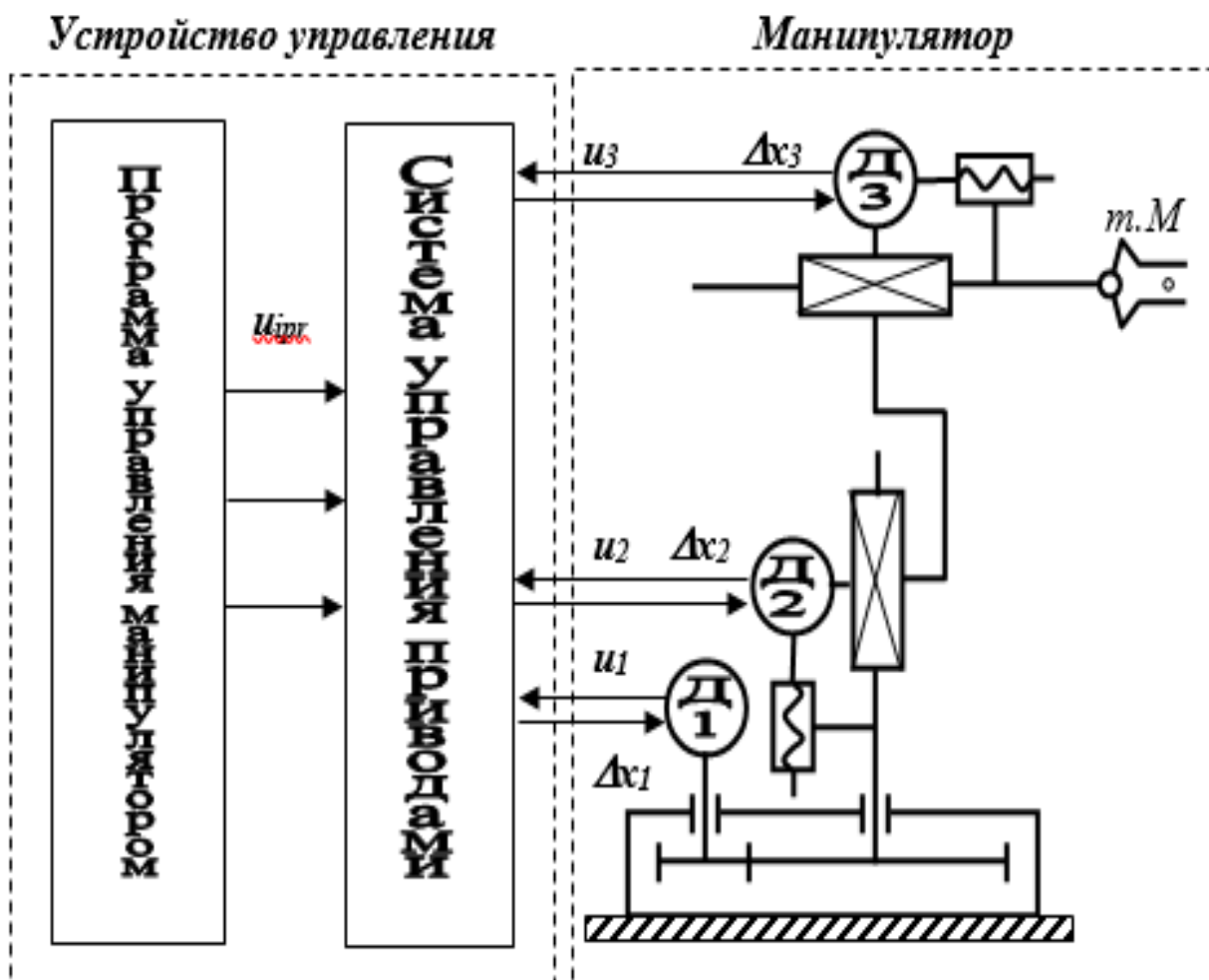


Рисунок 36 – Функциональная схема промышленного робота

В соответствии с этой классификацией движений, в манипуляторе можно выделить два участка кинематической цепи с различными функциями:

- механизм руки;
- механизм кисти.

Под «*рукой*» понимают ту часть манипулятора, которая обеспечивает перемещение центра схвата – точки *M* (региональные движения схвата).

Под «*кистью*» – те звенья и пары, которые обеспечивают ориентацию схвата (локальные движения схвата).

Структурная схема механизма – его графическое изображение, на котором показаны стойка, подвижные звенья, кинематические пары и их взаимное расположение. Графическое изображение элементов схемы выполняется с учетом принятых условных обозначений. В таблице 1 приведены условные обозначения кинематических пар.

Таблица 1 – Условные обозначения кинематических пар

Тип кинематической пары	Условное обозначение	Тип кинематической пары	Условное обозначение
Одноподвижная вращательная		Одноподвижная поступательная	
Двухподвижная цилиндрическая		Двухподвижная сферическая	
Трехподвижная сферическая		Трехподвижная плоская	

Кинематической цепью называется система звеньев, образующих между собой кинематические пары. Цепь, в которой каждое звено входит не более чем в две кинематические пары, называется простой. Незамкнутой называется такая кинематическая цепь, в которой есть звенья, входящие только в одну кинематическую пару.

Рассмотрим структурную схему антропоморфного манипулятора, то есть схему, которая в первом приближении соответствует механизму руки человека (рисунок 37). Этот механизм состоит из трех подвижных звеньев и трех кинематических пар: двух трехподвижных сферических $A_{3сф}$ и $C_{3сф}$ и одной одноподвижной вращательной $B_{1в}$.

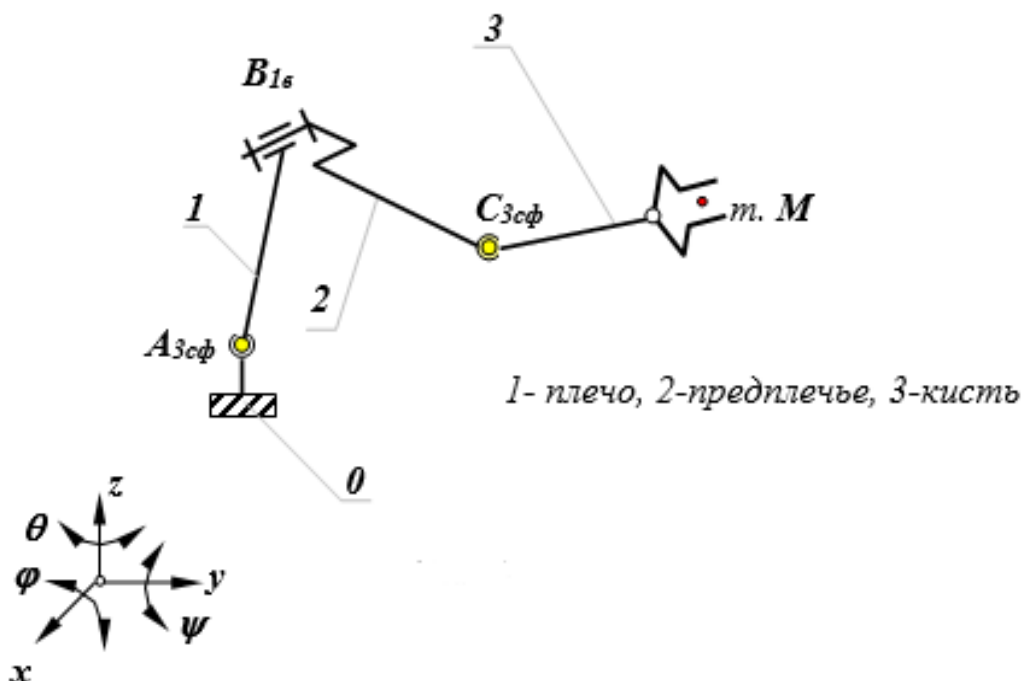


Рисунок 37 – Структурная схема антропоморфного манипулятора

Кинематические пары манипулятора характеризуются:

- именем или обозначением КП – заглавная буква латинского алфавита (А, В, С и т.д.);
- звеньями, которые образуют пару (0/1, 1/2 и т.п.);
- относительным движением звеньев в паре (для одноподвижных пар – вращательное, поступательное и винтовое);
- подвижностью КП (для низших пар от 1 до 3, для высших пар от 4 до 5);

– осью ориентации оси КП относительно осей базовой или локальной системы координат.

Рабочее пространство манипулятора (рабочий объем) – часть пространства, ограниченная поверхностями, огибающими к множеству возможных положений его звеньев.

Зона обслуживания манипулятора – часть пространства, соответствующая множеству возможных положений центра схвата манипулятора. Зона обслуживания является важной характеристикой манипулятора. Она определяется структурой и системой координат руки манипулятора, а также конструктивными ограничениями, наложенными относительно перемещения звеньев в КП.

Подвижность манипулятора W – число независимых обобщенных координат, однозначно определяющее положение схвата в пространстве:

$$W = 6 \cdot n - \sum_{i=1}^5 (6 - i) \cdot p_i. \quad (20)$$

Или для незамкнутых кинематических цепей:

$$W = \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i. \quad (21)$$

Маневренность манипулятора M (пространственная – общая) – подвижность манипулятора при зафиксированном (неподвижном) схвате:

$$M = W - 6. \quad (22)$$

Возможность изменения ориентации схвата при размещении его центра в заданной точке зоны обслуживания характеризуется *углом сервиса* – телесным углом ψ , который может описать последнее звено манипулятора (звено на котором закреплен схват) при фиксации центра схвата в заданной точке зоны обслуживания

$$\psi = \frac{f_c}{l_{cm}}, \quad (23)$$

где f_c – площадь сферической поверхности, описываемая точкой С звена 3;

l_{cm} – длина звена 3.

Относительная величина k_ψ – называется **коэффициентом сервиса**:

$$\frac{\psi}{4 \cdot \pi}, \quad (24)$$

Для манипулятора, изображенного на рисунке 38:

1) подвижность манипулятора:

$$W = 6 \cdot 3 - (3 \cdot 2 - 5 \cdot 1) = 18 - 11 = 7;$$

2) маневренность:

$$M = 7 - 6 = 1; \quad (25)$$

3) формула строения (две сферических КП с тремя координатами каждая и одна КП вращения):

$$W = [\theta_{10} + \varphi_{10} + \psi_{10}] + \varphi_{21} + [\theta_{32} + \varphi_{32} + \psi_{32}].$$

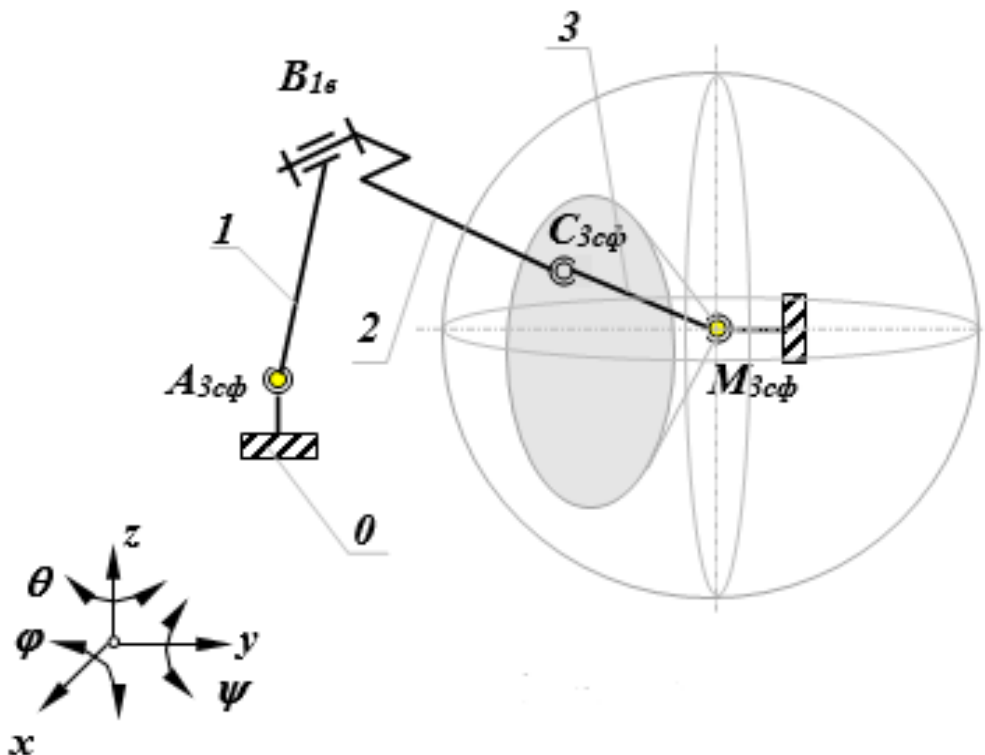


Рисунок 38 – Рабочий объем и зона обслуживания антропоморфного манипулятора

В таблице 2 приведены формулы строения манипуляторов некоторых существующих моделей роботов.

Таблица 2 – Формулы строения манипуляторов существующих типов промышленных роботов

№	Модель робота	Формула строения	№	Модель робота	Формула строения
1	Unimate	$W=\theta+x+\varphi+\varphi+\Psi+\varphi$	9	Fanuc M-1	$W=\theta+z+y+\varphi+\Psi+\varphi$
2	Универсал	$W=\theta+x+\varphi+\Psi+\varphi+\Psi$	10	Fanuc M-2	$W=z+\theta+x+\varphi+\Psi+\varphi$
3	Auto-Mate	$W=\theta+x+\varphi+\varphi+\Psi+\varphi$	11	Toyoda	$W=x+z+y+\Psi+\varphi$
4	Prab	$W=\theta+x+\varphi+\Psi+\varphi+\Psi$	12	Autohand	$W=z+y+x+\varphi+\Psi$
5	PC-40	$W=x+\varphi+\varphi+\theta+z+y$	13	Kaufeldt	$W=z+\theta+x+\varphi+\Psi$
6	PB-231	$W=x+\theta+z+y+\Psi+x$	14	IR-60	$W=\theta+\varphi+\varphi+\varphi+\Psi+\varphi$
7	Versatran	$W=y+\theta+z+x+\varphi+\theta$	15	Контур	$W=\theta+\varphi+\varphi+\Psi+\varphi+\Psi$
8	Matbac	$W=\theta+z+y+\Psi+\varphi+\Psi$	16	Asea	$W=\theta+\varphi+\varphi+\varphi+\Psi$

8 Индивидуальные задания структурного и кинематического анализа манипулятора робота

8.1 Задание

Для заданных в таблице А.1 (Приложение А) манипуляторов провести структурный и кинематический анализ механизма выполнив при этом следующее:

- выбрать систему координат $Oxyz$;
- вычертить структурную схему манипулятора, на которой оси пар ориентировать по осям этой системы;
- обозначить на ней звенья – цифрами;
- обозначить кинематические пары – латинскими буквами;
- в обозначении КП индексами указать подвижность и вид пары (вращательная – 1в, поступательная – 1п, сферическая – 3сф, цилиндрическая – 2ц);

- обозначить на схеме относительные перемещения звеньев в КП (линейные перемещения – x, y, z ; угловые – φ, θ, ψ);
- составить и записать формулу строения механизма;
- определить звенья, образующие соответственно «руку» и «кисть» манипулятора;
- определить систему координат «руки» манипулятора;
- определить число звеньев (общее и подвижных), число одноподвижных кинематических пар (поступательных и вращательных);
- подсчитать число подвижностей механизма и маневренность (пространственную – общую и базовую);
- число избыточных связей в механизме;
- для кинематических пар механизма определить звенья, образующие КП, относительное движение в КП, подвижность КП и ориентацию оси КП относительно осей системы координат;
- изобразить зону рабочего объема и зону обслуживания без указания конкретного размера, обозначив геометрические размеры латинскими буквами с цифровыми индексами в соответствии с номерами звеньев;
- внести все полученные данные в таблицы по образцу таблиц 3 и 4.

8.2 Пример структурного и кинематического анализа

В качестве примера рассмотрим структурный и кинематический анализ манипулятора робота *Unimate*. Структурная схема механизма изображена на рисунок 39.

Заполним таблицы лабораторного журнала. После заполнения таблицы сделаем вывод, который для данной схемы можно сформулировать так:

Манипулятор Unimate является шестиподвижным пространственным механизмом со сферической системой координат и разомкнутой кинематической цепью.

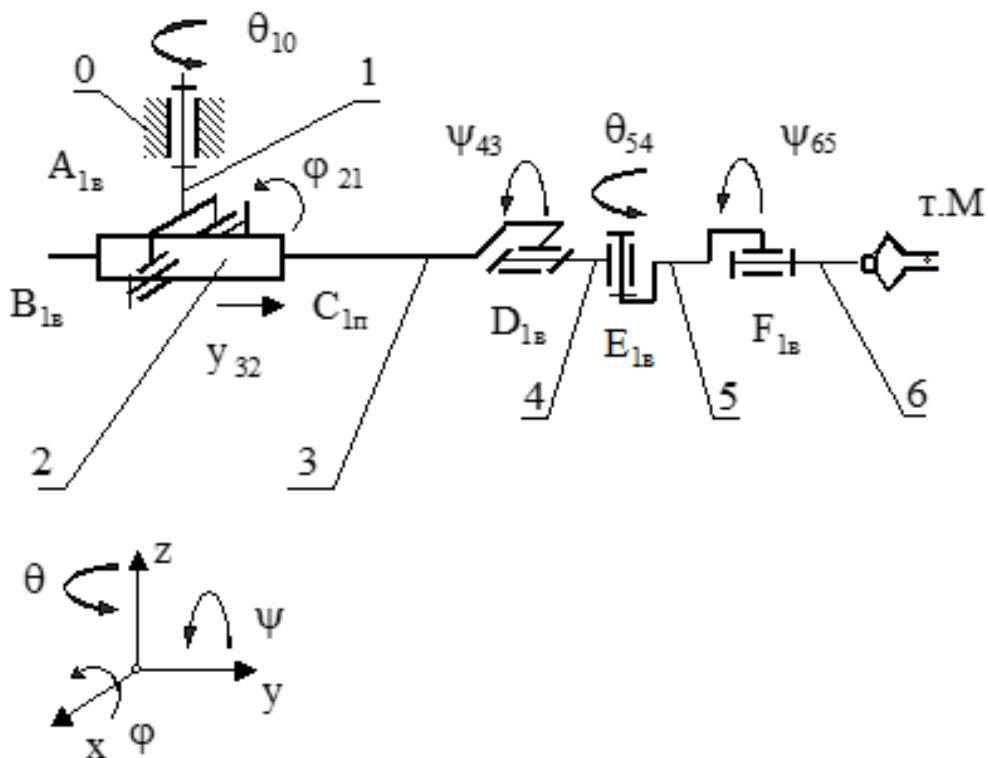


Рисунок 39 – Структурная схема манипулятора

Таблица 3 – Основные параметры структурной схемы манипулятора

№	Параметры	Показатели			
1	Формула строения	$W = \theta_{10} + \varphi_{21} + y_{32} + \psi_{43} + \theta_{54} + \psi_{65}$			
2	Подвижные звенья, образующие манипуляторе	в	“руку”		
			1	2	3
3	Система координат манипулятора	“руки”	сферическая		
			4	5	6
4	Число звеньев	общее	k	7	
		подвижных	n	6	
5	Число одноподвижных кинематических пар	вращательных	r_{1B}	5	
		поступательных	$r_{1П}$	1	
6	Число подвижностей в пространстве	$W_{пр}$	6		
7	Маневренность в пространстве (общая)	$M_{пр}$	0		
8	Маневренность базовая	$M_б$	0		
9	Число избыточных связей в механизме	q	0		

Таблица 4 – Кинематические пары манипулятора

Параметры	Показатели					
	А	В	С	Д	Е	Ф
Обозначение КП	А	В	С	Д	Е	Ф
Звенья, образующие КП	1/0	2/1	3/2	4/3	5/4	6/5
Относит. движение	вр.	вр.	пост.	вр.	вр.	вр.
Подвижность в КП	1	1	1	1	1	1
Ось ориентации КП	z	x	y	y	z	y

9 Контрольные вопросы для самопроверки

- 1) Как определяется понятие "промышленный робот»?
- 2) Из каких основных составных частей состоит промышленный робот?
- 3) По каким основным признакам классифицируются промышленные роботы?
- 4) Как классифицируются ПР по уровню вводимой информации и способу обучения?
- 5) Каковы основные технические характеристики промышленных роботов?
- 6) Как определяется число степеней подвижности ПР, и какие степени подвижности различают?
- 7) Каковы величины и скорости перемещения рабочих органов современных промышленных роботов?
- 8) Что такое рабочая зона, и какими параметрами она характеризуется?
- 9) Что такое пространственная (общая) маневренность манипулятора?
- 10) Что такое базовая маневренность манипулятора?
- 11) В чем принципиальное отличие кинематических цепей манипуляторов от других механизмов?
- 12) Что такое зона обслуживания манипулятора?
- 13) Что такое коэффициент сервиса, в каких пределах он изменяется?

- 14) Что такое угол сервиса?
- 15) Какова целесообразность создания и применения специальных грузоподъемных кранов-роботов?
- 16) Каковы разновидности кранов-роботов и их конструктивные особенности?
- 17) Что означает понятие «число избыточных связей»?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1) Чмиль, В.П. Теория механизмов и машин : учебно-методическое пособие / В.П. Чмиль. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 280 с. – ISBN 978-5-8114-1222-8. – URL: <https://e.lanbook.com/book/91896> (дата обращения: 25.08.2019).

2) Мерко, М.А. Теория механизмов и машин / М.А. Мерко, А.В. Колотов, М.В. Меснянкин, А.А. Шаронов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : СФУ, 2015. – 248 с. – ISBN 978-5-7638-3362-1. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497728> (дата обращения: 25.08.2019).

3) Кузнецов Е.С., Специальные грузоподъемные машины, в 9 кн. Кн. 2 [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.С. Кузнецов, К.Д. Никитин, А.Н. Орлов / под ред. проф. К.Д. Никитина - Красноярск : СФУ, 2011. – 280 с. – ISBN 978-5-7638-2338-7 – URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785763823387.html> (дата обращения: 25.08.2019).

4) Тарабарин, В.Б., Лабораторный практикум по теории механизмов и машин: Метод. указания к лабораторным работам по дисциплине "Теория механизмов и механика машин" / Тарабарин В.Б., Кузенков В.В., Фурсяк Ф.И. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 96 с. – ISBN -- – URL: http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0316.html (дата обращения: 25.08.2019).

5) Пономарев, С.В. Компоненты приводов мехатронных устройств / С.В. Пономарев, А.Г. Дивин, Г.В. Мозгова, и др. ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский

государственный технический университет». – Тамбов : , 2014. – 295 с. – ISBN 978-5-8265-1294-4. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277916> (дата обращения: 25.08.2019).

6) Егоров, О.Д. Механика роботов / О.Д. Егоров ; Министерство транспорта Российской Федерации, Московская государственная академия водного транспорта. – Москва : Альтаир-МГАВТ, 2007. – 224 с. ISBN -- – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=429843> (дата обращения: 25.08.2019).

7) Дюндик, О.С. Строение и кинематика механизмов / О.С. Дюндик ; Минобрнауки России, Омский государственный технический университет. – Омск : Издательство ОмГТУ, 2017. – 144 с. – ISBN 978-5-8149-2420-9. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493290> (дата обращения: 25.08.2019).

Приложение А

Индивидуальные задания к практической работе

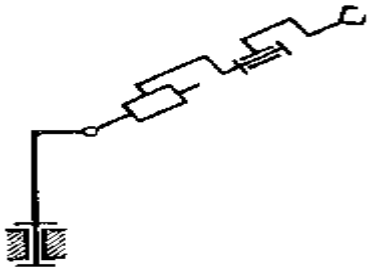

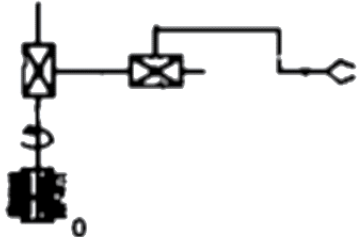
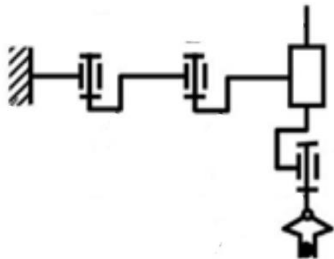
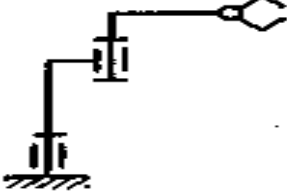
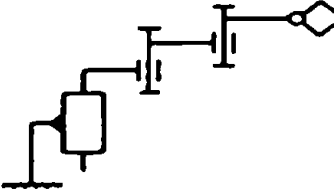
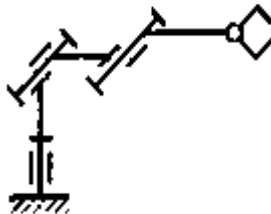
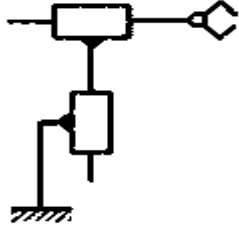
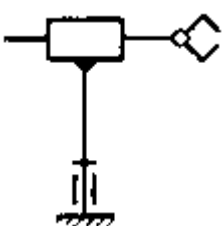
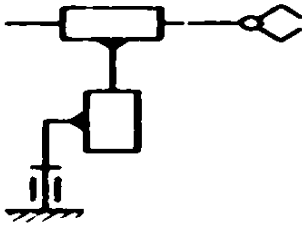
Таблица А.1 – Индивидуальные задания к практической работе

№ варианта	Кинематическая схема	№ варианта	Кинематическая схема
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	

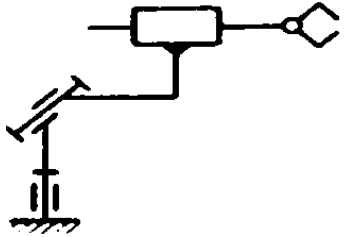
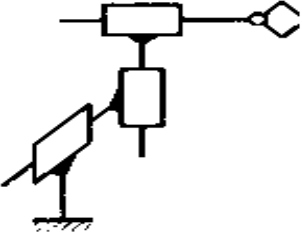
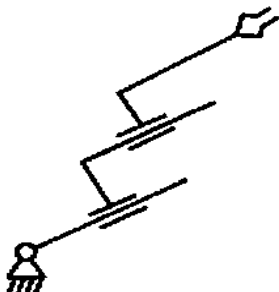
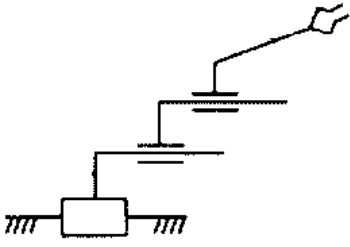
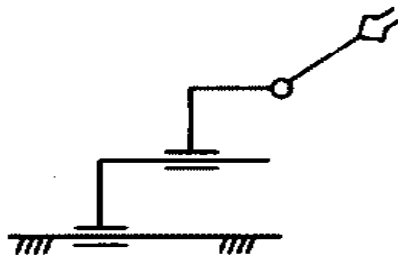
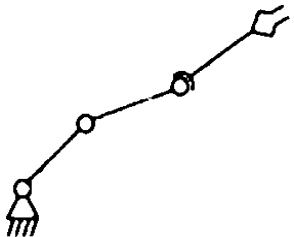
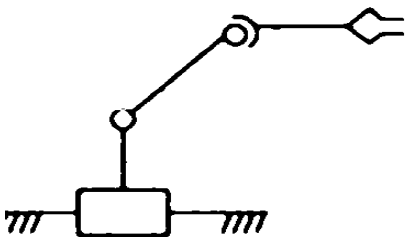
Продолжение таблицы А.1

№ варианта	Кинематическая схема	№ варианта	Кинематическая схема
11		12	
13		14	
15		16	
17		18	
19		20	

Продолжение таблицы А.1

№ варианта	Кинематическая схема	№ варианта	Кинематическая схема
21		22	
23		24	
25		26	
27		28	
29		30	

Продолжение таблицы А.1

№ варианта	Кинематическая схема	№ варианта	Кинематическая схема
31		32	
33		34	
35		36	
37		38	