

1. Робототехника — область мехатроники. Робот. Промышленный робот. Классификация ПР.
2. Структура ПР и его исполнительного устройства.
3. Структура исполнительных механизмов роботов.
4. Кинематические пары, степени подвижности и их классификация.
5. Кинематические цепи и их виды.
6. Движения исполнительного механизма робота и обобщенные координаты.
7. Компоненты привода исполнительного устройства робота.
8. Структурный анализ механизмов роботов.
9. Структурная и конструктивная избыточность механизма робота.
10. Число степеней подвижности механизма и его подвижность.
11. Синтез основных структурных схем исполнительных механизмов роботов.
12. Синтез схем механизмов роботов со структурной избыточностью.
13. Синтез замкнутых механизмов робототехнических устройств, а также разомкнутых механизмов с местными замкнутыми контурами при помощи структурных групп со структурной избыточностью.
14. Векторный способ кинематического анализа механизмов роботов.
15. Матричный способ кинематического анализа механизмов роботов.
16. Силы и моменты, действующие в механизмах роботов.
17. Силовой расчёт механизмов роботов.
18. Динамическая модель механизма робототехнического устройства.
19. Условие кинетостатической определимости кинематических цепей механизмов робототехнических устройств.
20. Силы в кинематических парах робототехнических устройств.
21. Расчет износа цилиндрических и сферических кинематических пар.
22. Приведение моментов сил в механизмах роботов.
23. Силы трения во вращательной кинематической паре робота.
24. Линейные и угловые скорости и ускорения точек и звеньев механизмов роботов.
25. Линейный износ соприкасающихся тел механизмов роботов.
26. Силы трения в поступательной кинематической паре робота.
27. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в дифференциальной форме при вращательном движении звена приведения.
28. Расчет ресурса цилиндрических подшипников скольжения роботов.
29. Приведение моментов инерции в механизмах роботов.
30. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в энергетической форме при поступательном движении звена приведения.
31. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в энергетической форме при вращательном движении звена приведения.
32. Приведение сил в механизмах роботов.
33. Приведение масс в механизмах роботов.
34. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в дифференциальной форме при поступательном движении звена приведения.
35. Виды расчетов износа соприкасающихся тел механизмов роботов.
36. Кинематическая точность механизмов роботов.
37. Виды изнашивания соприкасающихся тел механизмов роботов.
38. Силы трения в механизмах роботов.
39. Виды трения в механизмах роботов.
40. Коэффициент полезного действия механизмов роботов

1. Робототехника — область мехатроники. Робот. Промышленный робот. Классификация ПР.

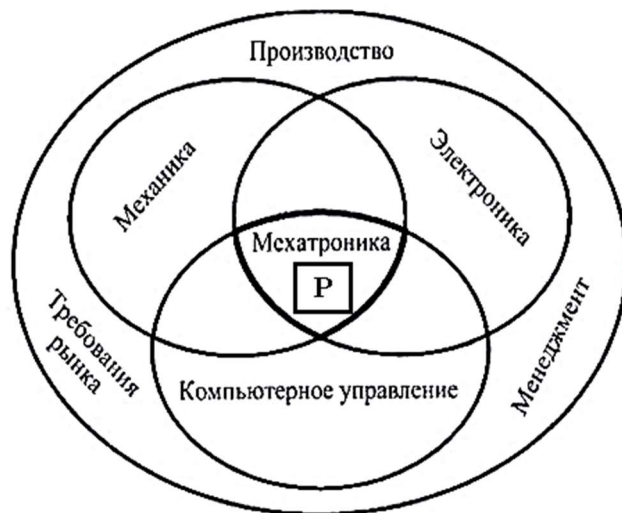
Робототехника – область науки и техники, связанная с созданием, исследованием и применением роботов, охватывает вопросы проектирования, программного обеспечения, оцувствления роботов, управления ими, а также роботизации промышленности и непромышленной сферы.

Робот – многофункциональная перепрограммируемая машина, для полностью или частично автоматического выполнения двигательных функций аналогично живым организмам, а также некоторых интеллектуальных функций человека.

Промышленный робот – робот, предназначенный для выполнения технологических и (или) вспомогательных операций в промышленности.

В зависимости от специфики применения различают роботы непромышленного назначения: например, «пожарный робот», «сельскохозяйственный робот», «военный робот» и т.д. Технологический промышленный робот – промышленный робот для выполнения технологических переходов, операций, процессов, оснащенный рабочим или измерительным инструментом.

Мехатроника – область науки и техники, основанная на синергетическом объединении механических, электротехнических, электронных и компьютерных компонентов, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых устройств с интеллектуальным управлением их функциональными движениями [5]. Созданные при этом устройства называют мехатронными.



Классификация промышленных роботов.

1. По характеру выполняемых операций:

технологические (производственные) – выполняют основные операции технологического процесса (гибка, сварка, сборка, окраска и т.д.);

вспомогательные (подъемно – транспортные) – применяют при обслуживании основного технологического оборудования для автоматизации вспомогательных операций (установки – снятия заготовок, деталей и инструмента, а также на транспортно – складских операциях);

универсальные – выполняют различные операции и в том числе работы совместно с различными видами оборудования.

3 По степени специализации:

специальные – выполняют определенную технологическую операцию или обслуживают конкретную модель основного технологического оборудования;

специализированные (целевые) – выполняют технологические операции одного вида (сборка, сварка и т.д.) или обслуживают широкую номенклатуру моделей основного технологического оборудования, объединенных общностью манипуляционных действий;

многоцелевые – выполняют различные основные и вспомогательные операции.

3. По области применения и виду производства:

литейные, штамповочные, сварочные, механической обработки, термообработки, нанесения покрытий, сборочные, автоматического контроля, лазерной обработки, транспортно – складские и пр.

4. По виду систем координат, в которых они работают:

прямоугольная (плоская и пространственная);

полярная (плоская, цилиндрическая и сферическая);

ангулярная или угловая (плоская и сферическая).

5. По числу степеней подвижности:

с одной, двумя, тремя, четырьмя степенями подвижности;

со степенями подвижности более четырех.

6. По грузоподъемности:

сверхлегкие – грузоподъемность до 1 кг;

легкие – свыше 1 до 10 кг;

средние – свыше 10 до 200 кг;

тяжелые – свыше 200 до 1000 кг;

сверхтяжелые – свыше 1000 кг.

7. По мобильности (подвижности):

стационарные и подвижные.

8. По способу установки на рабочем месте:

встроенные в оборудование, напольные, подвесные.

9. По типу силового привода:
электромеханические, пневматические, гидравлические, комбинированные.
10. По месту расположения приводов:
в едином блоке, на подвижных звеньях, комбинированная компоновка.
11. По количеству манипуляторов:
с одним, двумя, тремя и четырьмя манипуляторами.
12. По исполнению:
нормальные, пылезащитные, теплозащитные, влагозащитные, взрывобезопасные и т.д.
13. По быстродействию:
малое – линейные скорости по отдельным степеням подвижности до 0,5 м/с;
среднее – линейные скорости свыше 0,5 до 1 м/с;
высокое – линейные скорости свыше 1 м/с.
14. По точности позиционирования:
малая – погрешность позиционирования до 1 мм и выше;
средняя – погрешность позиционирования от 0,1 до 1 мм;
высокая – погрешность позиционирования менее 0,1 мм.
15. По характеру отработки программы:
жесткопрограммируемые – программа действий содержит полный набор информации не изменяющейся в процессе работы;
адаптивные – осуществляют свои действия с использованием информации об объектах и явлениях внешней среды, полученной в процессе работы. Имеют сенсорное обеспечение, позволяющее корректировать управляющую программу;
гибкопрограммируемые – способны формировать программу своих действий на основе поставленной цели и информации об объектах и явлениях внешней среды.
16. По характеру программирования:
позиционные – движение осуществляется от точки к точке;
контурные – движение осуществляется по непрерывной траектории;
комбинированные.
17. По дискретности перемещения:
многоточечные, малоточечные.

2. Структура ПР и его исполнительного устройства.

Промышленный робот – робот, предназначенный для выполнения технологических и (или) вспомогательных операций в промышленности.

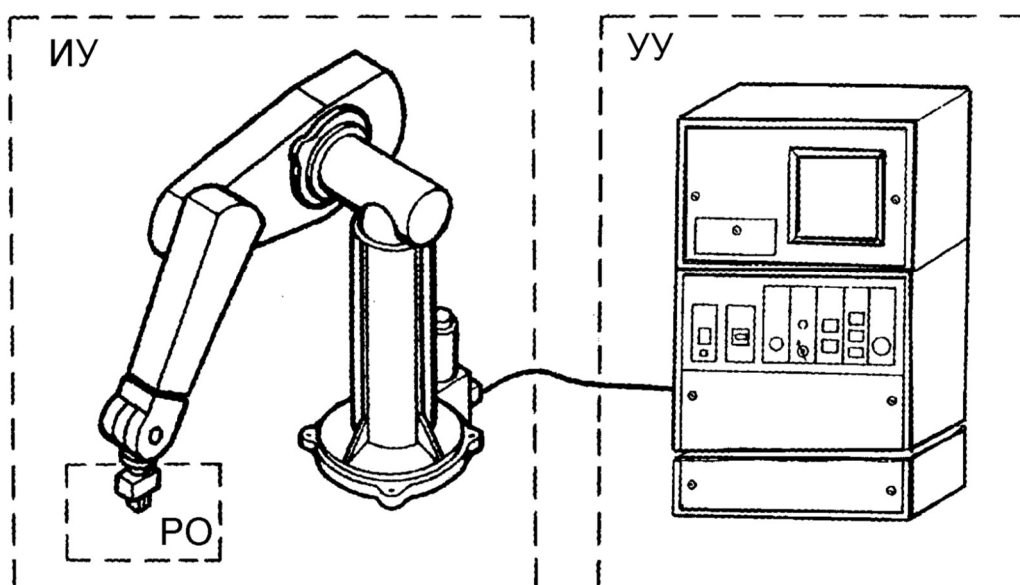
В состав промышленного робота входят:

исполнительное устройство (ИУ) – устройство промышленного робота, выполняющее все его двигательные функции (рис. 2.18);

рабочий орган (РО) – составная часть исполнительного устройства промышленного робота для непосредственного выполнения технологических операций и(или) вспомогательных переходов. Примерами рабочего органа служат сварочные клещи, окрасочный пистолет, сборочный инструмент, захватное устройство рабочий орган робота, предназначенный для взятия и удержания объекта рабочей среды;

устройство управления (УУ) – устройство промышленного робота для формирования и выдачи управляющих воздействий исполнительному устройству в соответствии с управляющей программой (рис. 2.18)

ПР



3. Структура исполнительных механизмов роботов.

Основным компонентом исполнительного устройства, определяющим его функциональное назначение, является исполнительный механизм – многозвенная несущая часть исполнительного устройства, реализующая двигательную функцию. Он представляет собой систему твердых и упругих тел, соединенных между собой различными видами связей.

Исполнительный механизм – это один из видов большого разнообразия существующих механизмов. Поэтому дано общее определение механизма.

Механизм – система твердых тел, подвижно соединенных между собой различными видами связей, реализующая управляемую двигательную функцию, т.е. осуществляющая преобразование управляемого движения одного или нескольких тел системы в требуемое управляемое движение других тел.

Твердые тела, входящие в состав исполнительного механизма и являющиеся его функциональными элементами называют **звеньями**. Звено механизма конструктивно может состоять из нескольких **деталей**, не имеющих между собой относительного движения.

Звено, принимаемое за неподвижное, называют **основанием (стойкой)**. Звено, которому сообщают движение, преобразуемое исполнительным механизмом в требуемые движения других звеньев, называют **входным**. Звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен исполнительный механизм, называют **выходным**.

Звенья, находящиеся между входным и выходным звеньями называют **промежуточными**. Под связями понимают кинематические пары.

Кинематическая пара (КП) – соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительные движения. Каждая кинематическая пара обладает определенной подвижностью. Кинематические пары можно условно разделить на пассивные и активные.

Пассивная кинематическая пара (далее кинематическая пара) – соединение двух звеньев не позволяющее осуществлять данное управляемое движение одного звена пары относительно другого.

Совокупность поверхностей, линий и точек звена, входящих в соприкосновение (контакт) с другим звеном кинематической пары, называют **элементом пары**. Для того, чтобы элементы пары находились в постоянном соприкосновении, пара должна быть замкнута геометрическим (за счет конструктивных форм звеньев) или силовым (силой тяжести, пружиной, силой давления жидкости или газа и т.п.) способом.

Кинематические пары классифицируют по числу связей (ограничений), налагаемых на относительное движение звеньев на **кинематические пары пятого, четвертого, третьего, второ- го и первого классов** (табл. 2.1) [1].


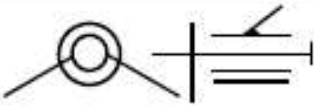
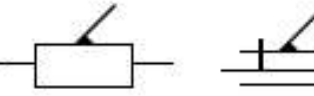
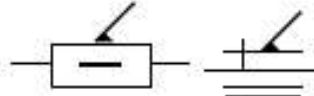
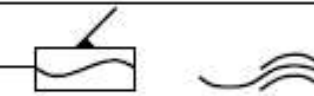
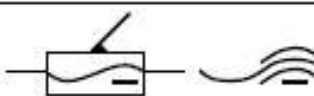
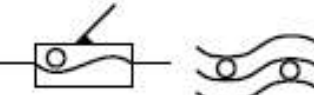
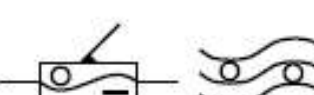
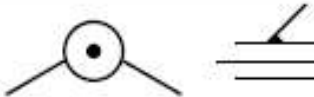





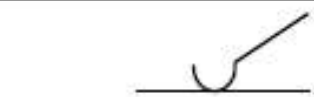

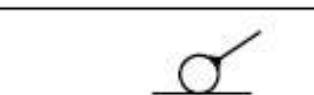
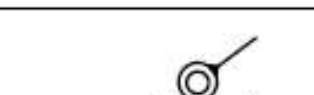
По характеру соприкосновения их делят на низшие, если элементы звеньев соприкасаются только по поверхности, и высшие, если элементы звеньев соприкасаются по линиям или в точках.

Преимущество низших кинематических пар по сравнению с высшими – возможность передачи больших сил, поскольку контактная поверхность соприкасающихся звеньев низшей пары может быть весьма значительной. Применение высших пар позволяет уменьшить трение (например, шарикоподшипник) и почти самые разнообразные законы движения выходного звена путем придания определенной формы звеньям, образующим высшую пару.

Кинематические пары во многом определяют работоспособность и надежность мехатронного модуля, поскольку через них передаются усилия от одного звена к другому, вследствие относительного движения возникает трение, элементы пары находятся в напряженном состоянии и в процессе изнашивания.

4. Кинематические пары, степени подвижности и их классификация.

Классификация кинематических пар и степеней подвижности

Класс и число связей	Наименование соединения	Условное графическое изображение и обозначение	
		кинематической пары	степени подвижности
5	Одноподвижное (вращательное)	 В	 В
	Одноподвижное (поступательное)	 П	 П
	Одноподвижное (винтовое)	 Ви	 Ви
	Одноподвижное (шарико-винтовое)	 Вш	 Вш
4	Двухподвижное (цилиндрическое)	 Ц	 Ц
	Двухподвижное (сферическое)	 Сп	 Сп
3	Трёхподвижное (сферическое)	 С	 С
2	Четырёхподвижное (линейное)	 Л	 Л
1	Пятиподвижное (точечное)	 Т	 Т

Шарнир бывает сложный и простой. *Сложный шарнир* – это соединение нескольких звеньев, сходящихся в одном узле, допускающее их относительное движение

В сложном шарнире число кинематических пар определяют по формуле $\theta = N - 1$, где N – число звеньев, сходящихся в шарнире.

Простой шарнир – соединение двух звеньев, сходящихся в одном узле, допускающее их относительное движение. В простом шарнире число кинематических пар равно единице.

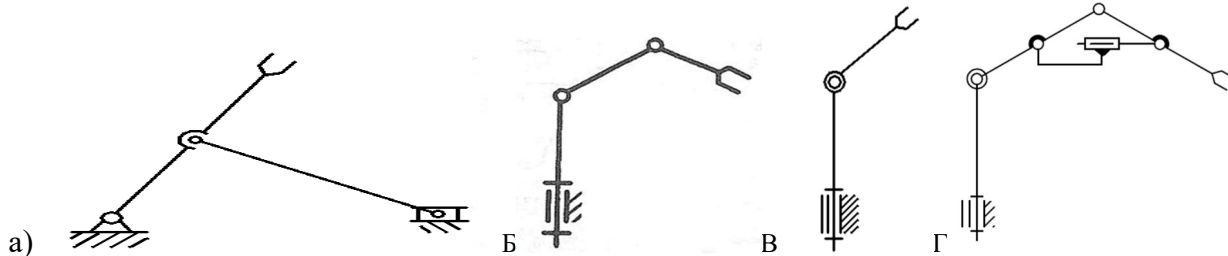
Активные кинематические пары позволяют сообщать одному из звеньев пары управляемые обобщенные координаты. Такие кинематические пары называют степенями подвижности.

Степень подвижности (СП) – соединение звеньев, позволяющее сообщать одному из них управляемые обобщенные координаты. Степень подвижности включает в себя приводы, сообщающие движения звен

5. Кинематические цепи и их виды.

Если несколько звеньев соединить между собой только кинематическими парами, то получим **кинематическую цепь (КЦ)**. Такая кинематическая цепь относительно одного или нескольких ее звеньев будет неподвижной. Для приведения ее в движение необходимо одну или несколько кинематических пар заменить на степени подвижности и задать им **обобщенные координаты**.

В зависимости от вида движения звеньев **кинематические цепи** подразделяют на **плоские (а)** – звенья движутся в одной или нескольких параллельных плоскостях, и **пространственные (б)** – звенья движутся в пространстве. В зависимости от характера соединения звеньев **кинематические цепи** делят на **замкнутые а)** и **незамкнутые** (рис. б и рис. в), а также **незамкнутые с местными замкнутыми контурами (г)**.



Исполнительный механизм робота в процессе функционирования может иметь различную структуру. Во время движения в пространстве его можно рассматривать как **незамкнутую кинематическую цепь**.

6. Движения исполнительного механизма робота и обобщенные координаты.

Движения звеньев исполнительного механизма и самого исполнительного механизма в зависимости от функционального назначения делят на следующие виды:

1. ориентирующие (локальные) – предназначены для придания рабочему органу (РО) необходимой ориентации в заданной точке рабочей зоны (рис. 2.26, степень подвижности Е);
2. транспортирующие (региональные) – предназначены для перемещения рабочего органа в различные точки рабочей зоны (рис. 2.26, звенья ВС, СД, ДЕ, приводимые в движения в степенях подвижности В, С, Д);
3. координатные (глобальные) – обеспечивают перемещение исполнительного механизма между отдельными производственными позициями на расстояния, превышающие обычно как размеры самого робота, так и размеры обслуживаемого оборудования и рабочего места (рис. 2.26, степень подвижности А).

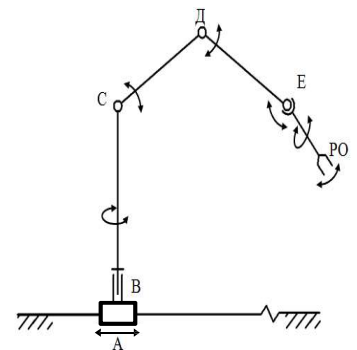
Обобщенная координата – независимая переменная, определяющая положение последующего звена исполнительного механизма относительно предыдущего. Угловые обобщенные координаты обозначают φ_{ij} , линейные – S_{ij} . Первый индекс i означает положение какого звена определяют, второй индекс j – относительно какого звена определяют положение звена i . В общем случае угловые и линейные обобщенные координаты обозначают q_i .

Начало отсчета угловой обобщенной координаты выбирают на продолжении предыдущего (j -го) звена, конец – на направлении последующего (i -го) звена (рис. 2.27).

Началом отсчета линейной обобщенной координаты является середина поступательной кинематической пары, концом – конечная точка выдвигающегося звена.

Для первого звена начало отсчета выбирают на оси x системы координат, связанной с основанием.

Обобщенную координату считают положительной, если ее направление не совпадает с направлением хода часовой стрелки, и отрицательной – если совпадает с направлением хода часовой стрелки. На рис. 2.27, а, б показаны обобщенные координаты, определяющие положение звена i относительно звена j .



7. Компоненты привода исполнительного устройства робота.

В зависимости от используемого вида энергии привода подразделяют на пневматические, гидравлические, электромеханические, комбинированные.

1. **Двигатели (Д)** – это преобразователи электрической, пневматической, гидравлической и др. энергии в механическую.

Они бывают:

- электрические; • пневматические; • гидравлические; • прочие.

2. **Преобразователи движения (ПД)** – механизмы, предназначенные для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена исполнительного устройства.

Типы преобразователей движения:

3. зубчатые (цилиндрические, конические, реечные, планетарные, волновые, червячные и др.);

4. рычажные;

5. винтовые (скольжения; качения – шариковинтовые и роликовинтовые; дифференциальные, интегральные);

6. ременные (плоской клиноременные, зубчатым ремнем

Основные функциональные характеристики преобразователей движения:

Информационные устройства (ИУ) или датчики информации – совокупность аппаратно-программных средств, предназначенных для получения информации о внешней среде и внутреннем состоянии объекта. Они преобразуют контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия ими на управляемые процессы.

4. **Устройство компьютерного управления (УКУ)** – комплекс аппаратных и программных средств, вырабатывающий сигналы управления исполнительным устройством. В его состав входят:

1. задающее устройство (например, джойстики и рукоятки);

2. пульт управления оператора;

3. вычислительные и преобразующие устройства;

4. периферийные устройства ввода-вывода информации

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) – устройства, предназначенные для преобразования цифровой информации в аналоговую. Они формируют сигнал в виде напряжения и тока, функционально связанных с управляющим кодом. В большинстве случаев эта функциональная зависимость является линейной.

Силовые преобразователи (СП) – устройства, предназначенные для подвода и преобразования электрической энергии к двигателям и представляющие собой импульсные оконечные усилители мощности.

Контроллеры движения – специализированные микроконтроллеры для управления двигателями различных типов.

Дополнительные механические компоненты исполнительных устройств роботов.

1. **Тормозные устройства (ТУ)** – устройства, предназначенные для уменьшения скорости подвижности звена, останова и удержания его в неподвижном состоянии:

2. **Предохранительные устройства (ПУ)** – устройства, предназначенные для предотвращения разрушения элементов исполнительного устройства, а также выхода из строя двигателей:

3. **Направляющие (Н)** – устройства, обеспечивающие заданное относительное движение выходного звена исполнительного устройства:

4. **Люфтовывбирающие устройства (ЛУ)** – устройства, предназначенные для выбора зазоров в некоторых видах преобразователей движения:

Рабочий орган – часть исполнительного устройства, осуществляющая непосредственное взаимодействие с объектами рабочей среды.

Захватное устройство – рабочий орган робота для захватывания и удержания предметов производства и (или) технологической оснастки, называемых *объектом*.

8. Структурный анализ механизмов роботов.

Структурный анализ механизма – исследование свойств механизма по заданной его структурной схеме. Его проводят по *структурным формулам*, по которым определяют число степеней подвижности механизма и его подвижность, а также число избыточных контурных связей и лишние контурные подвижности и указывают способы их устранения.

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i,$$

где n – число подвижных звеньев; i – класс кинематической пары или степени подвижности; p_i – число кинематических пар i -го класса.

Для плоских механизмов это формула П.Л. Чебышева

$$W_{\Pi} = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i$$

где цифра 4 относится к высшим кинематическим парам; цифра 5 – к низшим кинематическим парам.

Подвижность механизма указывает на то, какое число управляемых обобщенных координат необходимо задать, чтобы привести механизм в управляемое движение, т.е. сколько необходимо установить приводов

Если в кинематической цепи, число подвижностей которой относительно ее внешних кинематических пар равно нулю, и она не может распасться на более простые кинематические цепи, удовлетворяющие этому условию, то такую кинематическую цепь называют *структурной группой*.

Условие, описывающее пространственную структурную группу имеет вид [5]:

$$W_{\Gamma} = 6n_{\Gamma} - \sum_{i=1}^5 ip_i = 0.$$

Откуда можно найти число подвижных звеньев и кинематических пар пространственной структурной группы:

$$n_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^5 ip_i}{6}$$

Число подвижных звеньев и кинематических пар в плоской структурной группе должно быть целым.

Таким образом, присоединение структурных групп к механизму не изменяет его подвижности.

Если звенья плоской структурной группы соединены между собой кинематическими парами только 5-го класса, то такая структурная группа является *группой Ассура*. Для нее минимальное число подвижных звеньев и кинематических пар 5-го класса на основании формулы (3.8), равны $n=2$, $p_5=3$. Такую кинематическую цепь, состоящую из двух звеньев и трех кинематических пар пятого класса называют *диадой*

Кинематическую цепь, состоящую из четырех звеньев и шести кинематических пар называют триадой (рис. 3.1).

Число замкнутых контуров механизма определяют по формуле Х.И. Гохмана [10]:

$$K = \sum_{i=1}^5 p_i - n.$$

Иметь дополнительные подвижности, то число избыточных контурных связей j -го замкнутого контура изменится и его можно определить по формуле [2]:

$$S_j = 3 - \sum_{i=1}^5 (m-i)p_i,$$

где p_i – число кинематических пар i -го класса замкнутого контура; m – показатель, указывающий тип кинематических пар:

$$m = \begin{cases} 5 & \text{– для низших кинематических пар (5, 4 и 3 классов);} \\ 4 & \text{– для высших кинематических пар (2 и 1 классов).} \end{cases}$$

Отрицательное значение S_j указывает на то, что появились лишние подвижности замкнутого контура:

$$h_j = -S_j.$$

9. Структурная и конструктивная избыточность механизма робота.

Лишняя контурная подвижность – возможность звена поворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев вокруг их общей (групповой) оси вращения не оказывая влияния на функциональные возможности механизма.

Наличие избыточных контурных связей и лишних контурных подвижностей в структурной схеме механизма указывает на то, что механизм обладает **структурной избыточностью**.

Структурную избыточность всего механизма определяют по формуле [2]:

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K S_j = \sum_{j=1}^K \left[3 - \sum_{i=1}^5 (m-i)p_i \right]$$

Рассматриваемые замкнутые контуры должны быть независимыми, т.е. отличаться друг от друга хотя бы одним звеном и кинематической парой.

Следует отметить, что структурная схема механизма может обладать избыточными звеньями и кинематическими парами, не оказывающими влияния на его функциональные преобразования, но влияющими на качество работы механизма. Такой механизм обладает **конструктивной избыточностью**. При конструировании также необходимо стремиться к ее уменьшению.

Таким образом, подвижность механизма следует определять по зависимости [2]:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + \sum_{j=1}^K S_j - \sum_{j=1}^K Z_j,$$

где p_i – число пар i -го класса всего механизма; Z_j – число избыточных звеньев j -го замкнутого контура, не влияющих на функциональные движения выходных звеньев.

Подвижность механизма указывает на то, какое число управляемых обобщенных координат необходимо задать, чтобы привести механизм в управляемое движение.

$$W_{\Pi} = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i - \sum_{j=1}^K Z_j$$

где цифра 4 относится к высшим кинематическим парам (2-го и 1-го классов), цифра 5 – к низшим кинематическим парам (5-го, 4-го и 3-го классов).

10. Число степеней подвижности механизма и его подвижность.

Число степеней подвижности определять по формуле:

$$H = n - \sum_{j=1}^K A_j, \quad (3.17)$$

где n – число подвижных звеньев механизма; K – число замкнутых контуров; A_j – число, указывающие при помощи чего образован j -й замкнутый контур:

$$A_j = \begin{cases} 2, & \text{если замкнутый контур образован структурной группой;} \\ 1, & \text{если замкнутый контур образован одним звеном.} \end{cases}$$

11. Синтез основных структурных схем исполнительных механизмов роботов.

Структурный синтез механизмов – проектирование структурных схем механизмов по заданным условиям.

Синтез основных структурных схем механизмов. Основная структурная схема механизма – схема, содержащая минимальное число звеньев и кинематических пар, необходимых для реализации требуемого функционального движения выходного звена механизма, и не имеющая избыточных контурных связей, лишних контурных подвижностей и лишних звеньев.

Число подвижных звеньев и кинематических пар основных структурных схем механизмов исполнительных устройств, удовлетворяющих требуемому (заданному) числу подвижностей и виду кинематических пар, находят по формулам:

пространственных механизмов

$$n = \frac{W + \sum_{i=1}^5 ip_i}{6};$$

ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ

$$n = \frac{W_{\Pi} + \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i}{3}.$$

где цифра 4 относится к высшим кинематическим парам (второго и первого классов), цифра 5 – к низшим кинематическим парам (пятого, четвертого и третьего классов).

12. Синтез схем механизмов роботов со структурной избыточностью.

Число подвижных звеньев и кинематических пар, удовлетворяющих заданному числу подвижностей и виду кинематических пар, определяют по формулам:
для пространственного механизма

$$n = \frac{W + \sum_{i=1}^5 ip_i - \sum_{j=1}^K S_j + \sum_{j=1}^K Z_j}{6};$$

для плоского механизма

$$n = \frac{W_{\Pi} + \sum_{i=4}^5 (i - 3)p_i + \sum_{j=1}^K Z_j}{3}.$$

13. Синтез замкнутых механизмов робототехнических устройств, а также разомкнутых механизмов с местными замкнутыми контурами при помощи структурных групп со структурной избыточностью.

Структурная группа с избыточностью – кинематическая цепь с избыточными связями и лишними подвижностями, общее число подвижностей которой относительно ее внешних кинематических пар равно нулю, причем она не должна распадаться на более простые цепи, удовлетворяющие этому условию.

Условие существования структурной группы с избыточностью:

$$W_{\Gamma} = 6n_{\Gamma} - \sum_{i=1}^5 ip_i + \sum_{j=1}^K S_j = 0. \quad (3.22)$$

Используя это условие можно определить число подвижных звеньев, кинематических пар и их вид:

$$n_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^5 ip_i - \sum_{j=1}^K S_j}{6}. \quad (3.23)$$

14. Векторный способ кинематического анализа механизмов роботов.

Кинематический анализ механизма – определение законов движения звеньев механизма по заданным законам движения ведущих или ведомых звеньев. Основной задачей кинематики механизма является изучение движения его звеньев вне зависимости от их масс и действующих на них сил.

Прямая задача кинематики заключается в определении законов изменения координат выходного звена (или любого звена) механизма по известным законам изменения обобщенных координат.

Обратная задача кинематики заключается в определении законов изменения обобщенных координат механизма по известным законам изменения координат выходного звена.

Дифференциальный способ кинематического анализа механизмов После первого дифференцирования получают скорость точки или звена механизма, после второго дифференцирования – ускорение точки или звена.

Кинематический анализ механизмов с использованием передаточных функций. Этот способ кинематического анализа механизма используют в том случае, когда закон изменения обобщенной координаты во времени *не известен*. Поэтому определение перемещений, скоростей и ускорений точек и звеньев механизма осуществляют в функции его обобщенной координаты, т.е. чисто геометрически.

Функцию положения механизма с одной подвижностью при заданном законе изменения обобщенной координаты можно представить в виде (рис. 4.12):

$$\mathbf{r}_{Bi} = \mathbf{r}_{Bi}[q_1(t) \ l_i], \quad \mathbf{v}_{Bi} = \frac{d\mathbf{r}_{Bi}}{dt}, \quad \mathbf{a}_{Bi} = \frac{d^2\mathbf{r}_{Bi}}{dt^2} = \frac{d\mathbf{v}_{Bi}}{dt}, \quad \omega_{qi} = \frac{d\varphi_i}{dq_1}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_i = \frac{d^2\varphi_i}{dt^2} = \frac{d\omega_i}{dt}.$$

где l_i – длина i -го звена механизма; \mathbf{r}_{Bi} – радиус вектор точки Bi -го звена механизма; $q_1(t)$ – обобщенная координата

$$q_1(t) = \begin{cases} \varphi_1(t) - \text{угловая обобщенная координата} \\ S_1(t) - \text{линейная обобщенная координата} \end{cases}$$

Если переносное движение поступательное, то вектор абсолютного ускорения точки равен:

Для рассматриваемой точки вектор абсолютной линейной скорости равен

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_e$$

где \mathbf{v}_r – вектор переносной скорости точки; \mathbf{v}_e – вектор относительной скорости этой точки.

Если переносное движение поступательное, то вектор абсолютного ускорения точки равен:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_e = \mathbf{a}_r^n + \mathbf{a}_r^\tau + \mathbf{a}_e^n + \mathbf{a}_e^\tau = \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_e^n + \mathbf{a}_e^\tau.$$

где \mathbf{a}_r^n и \mathbf{a}_r^τ – векторы нормального и тангенциального переносного ускорений точки соответственно; \mathbf{a}_e^n и \mathbf{a}_e^τ – векторы нормального и тангенциального относительного ускорений точки соответственно:

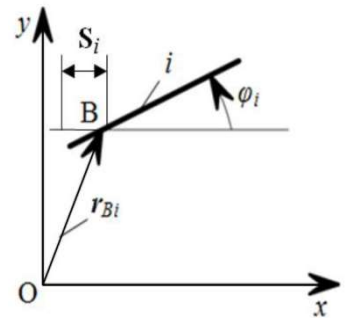
$$\mathbf{a}_e^n = \frac{v^2}{l} = \omega^2 l; \quad \mathbf{a}_e^\tau = \varepsilon l,$$

где l – радиус кривизны траектории; ω – вектор угловой скорости звена; ε – вектор углового ускорения звена.

Если переносное движение не поступательное, то появляется вектор дополнительного ускорения – ускорения Кориолиса \mathbf{a}^k . В этом случае вектор абсолютного ускорения точки будет равен:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_e + \mathbf{a}^k = \mathbf{a}_r^n + \mathbf{a}_r^\tau + \mathbf{a}_e^n + \mathbf{a}_e^\tau + \mathbf{a}^k = \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_e^n + \mathbf{a}_e^\tau + \mathbf{a}^k.$$

Вектор ускорения Кориолиса равен $\mathbf{a}^k = 2(\omega \times \mathbf{v}_e) = 2\omega v_e \sin \alpha,$



15. Матричный способ кинематического анализа механизмов роботов.

Положение какой либо точки M в трехмерном пространстве можно описать четырьмя числами x_1, x_2, x_3, x_4 , которые не все одновременно равны нулю и связаны с декартовыми координатами x, y, z равенствами:

$$x = \frac{x_1}{x_4};$$

$$y = \frac{x_2}{x_4};$$

$$z = \frac{x_3}{x_4}.$$

Эти числа называют **однородными координатами проективного пространства**. Без ограничения общности всегда можно принять $x_4 = 1$.

Точка $[0001]^T$ является началом системы координат.

Система координат, связанная с подвижным звеном механизма, представляет собой **локальную систему координат (ЛСК)**, которую связывают со звеном $i (i=1 \dots N)$ по следующему правилу:

- ось z_i ($i=1 \dots N-1$) направляют по оси кинематической пары, связывающей звенья i и $i+1$;
- ось x_i направляют перпендикулярно к осям z_{i-1} и z_i , а также так, чтобы она пересекала ось z_{i-1} ;
- ось y_i направляют перпендикулярно осям x_i и z_i и она должна обеспечить правую ориентацию всей системы координат.

Взаимное положение систем координат двух соседних звеньев определяют четыре независимых параметра. В связи с этим систему координат $(i-1)$ -го звена можно преобразовать в систему координат i -го звена (рис. 4.24) с помощью четырех последовательно выполняемых преобразований, математически описываемых четырьмя матрицами преобразований:

- поворот системы координат $(i-1)$ -го звена вокруг оси z_{i-1} на угол θ_i до тех пор, пока оси x_{i-1} и x_i не станут параллельными и направленными в одну сторону. **Матрица поворота $(i-1)$ -й ЛСК вокруг оси z_{i-1} на угол θ_i .**

$$A_{i,i-1}^{\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- перенос системы координат $(i-1)$ -го звена вдоль оси z_{i-1} на величину S_i до тех пор, пока оси x_{i-1} и x_i не совместятся (окажутся на одной прямой).

Матрица переноса $(i-1)$ -й ЛСК вдоль оси z_{i-1} на S_i

$$A_{i,i-1}^{S_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- перенос системы координат $(i-1)$ -го звена вдоль оси x_i на величину a_i до совпадения начал систем координат 0_{i-1} и 0_i . **Матрица переноса $(i-1)$ -й ЛСК вдоль оси x_i на величину a_i**

$$A_{i,i-1}^{a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- поворот системы координат $(i-1)$ -го звена вокруг оси x_i на угол α_i до совмещения всех осей систем координат $(i-1)$ -го и i -го звеньев.

Матрица поворота $(i-1)$ -й ЛСК вокруг оси x_i на угол α_i

$$A_{i,i-1}^{\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Для определения линейных скоростей и ускорений произвольной точки произвольного звена исполнительного устройства робота в матричной форме, рассмотрим правило дифференцирования матриц.

Матрица A_i преобразования i -й ЛСК в $(i-1)$ -ю ЛСК имеет вид:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

16. Силы и моменты, действующие в механизмах роботов.

Движение механизма происходит под действием приложенных к нему различных внешних сил и моментов (усилий). К ним относят [10]:

1. **Движущие силы и моменты** – это силы и моменты, которые стремятся ускорить движение механизма. Они приложены к ведущим звеньям механизма, направлены в сторону движения и совершают положительную работу.

2. **Силы и моменты сопротивления** – это силы и моменты, которые стремятся замедлить движение механизма. Они приложены к ведомым звеньям механизма, направлены в сторону противоположную движению и совершают отрицательную работу. Их делят на силы и моменты полезного и вредного сопротивления.

- **Силами и моментами полезного сопротивления** называют усилия, на преодоление которых затрачивается полезная работа, т.е. та работа, для выполнения которой и предназначен данный механизм.

- **Силами и моментами вредного сопротивления** называют усилия, на преодоление которых затрачивается дополнительная работа сверх полезной работы. Ими обычно являются силы и моменты трения.

3 **Силы тяжести подвижных звеньев и силы упругости** (в большинстве случаев пружин). Они совершают на отдельных участках движения механизма как положительную, так и отрицательную работу, хотя за полный цикл движения работа этих сил равна нулю.

4. **Силы взаимодействия между звеньями механизма**, т.е. силы, действующие в его кинематических парах – реактивные силы. Реакции в кинематических парах взаимнообратные

$$R_{12} = -R_{21}.$$

В результате движения механизма в кинематических парах возникают реактивные силы и моменты (силы взаимодействия между звеньями механизма, а также между стойкой (основанием) механизма и звеньями). *Реактивные силы и моменты относят к категории внутренних сил по отношению к механизму в целом; по отношению к каждому звену в отдельности они являются внешними.*

17. Силовой расчёт механизмов роботов.

Целью силового расчёта механизмов робототехнических устройств является определение реактивных сил и моментов в кинематических парах, а также внешних сил и моментов.

Запишем уравнения кинетостатики для i -го звена механизма, т.е. выражения главного вектора F_i внешних сил и главного момента M_i [4]:

$$F_i = R_{i-1,i} + \sum_{j=1}^n F_{ij} + \sum_{j=1}^m \Phi_{ij} = 0;$$

$$M_i = M_{i-1,i} + \sum_{j=1}^n M_{ij} + \sum_{j=1}^n M_{ij}^{\Phi} + \sum_{j=1}^n M_{ij}^I = 0$$

где j – номер силового фактора, действующего на i -е звено; n – число силовых факторов, действующих на i -е звено; $R_{i-1,i}$ – главный вектор реактивных сил в k -й кинематической паре, соединяющий $(i-1)$ и i -е звенья; F_{ij} – вектор внешней j -й силы, действующей на i -е звено (реактивной силы $R_{i,i+1}$, действующей со стороны $(i+1)$ -го звена на i -е звено, силы G_i от массы i -го звена, силы G_{iq} от массы q -го привода или, если i -е звено последнее в исполнительном механизме робота, силы F_c сопротивления и силы $G_{об}$ от массы объекта, закрепленного в захватном устройстве последнего звена робота); Φ_{ij} – вектор j -й силы инерции, действующей на i -е звено

$$\Phi_{ij} = -m_l a_{sl}, \quad (5.8)$$

m_i – масса i -го звена; a_l – вектор абсолютного линейного ускорения центра S_l масс l -го звена; $M_{i-1,i}$ – главный вектор реактивных моментов в k -й кинематической паре, соединяющей $(i-1)$ -е и i -е звенья; $M_{i,j}$ – j -й момент внешних силовых факторов (сил, моментов, реакции), действующих на i -е звено, M_{ij}^I – j -й инерционный момент, действующий на i -е звено

$$M_{ij}^I = -J_{Sl} \varepsilon_l; \quad (5.9)$$

J_{Sl} – момент инерции i -го звена относительно оси, проходящей через центр S_i масс i -го звена.

$$J_{Sl} = m_l \rho^2, \quad (5.10)$$

m_l – масса i -го звена; ρ – радиус инерции i -го звена относительно оси вращения; ε_l – вектор абсолютного углового ускорения i -го

18. Динамическая модель механизма робототехнического устройства.

Прежде чем перейдём к рассмотрению движения механизма выясним, какое звено механизма является ведущим и какое ведомым.

Ведущим (движущим, приводным) называют звено, для которого элементарная работа внешних сил, приложенных к нему, является положительной. Внешними силами считают силы, которые приложены со стороны материальных тел, не входящих в состав механизма.

Ведомым называют звено, для которого элементарная работа внешних сил, приложенных к нему, является отрицательной или равной нулю.

Следует отметить, что *одно и то же звено* на отдельных участках его движения может быть **как ведущим, так и ведомым**

Одной из основных задач динамики механизма является определение действительного закона движения его ведущего звена под действием заданных сил и моментов сил, приложенных к различным звеньям механизма.

Звеном приведения называют условное звено, обладающее условной переменной массой и переменным моментом инерции, которое заменяет весь механизм в динамическом отношении.

Полученную расчётную схему называют **одномассовой динамической моделью механизма**.

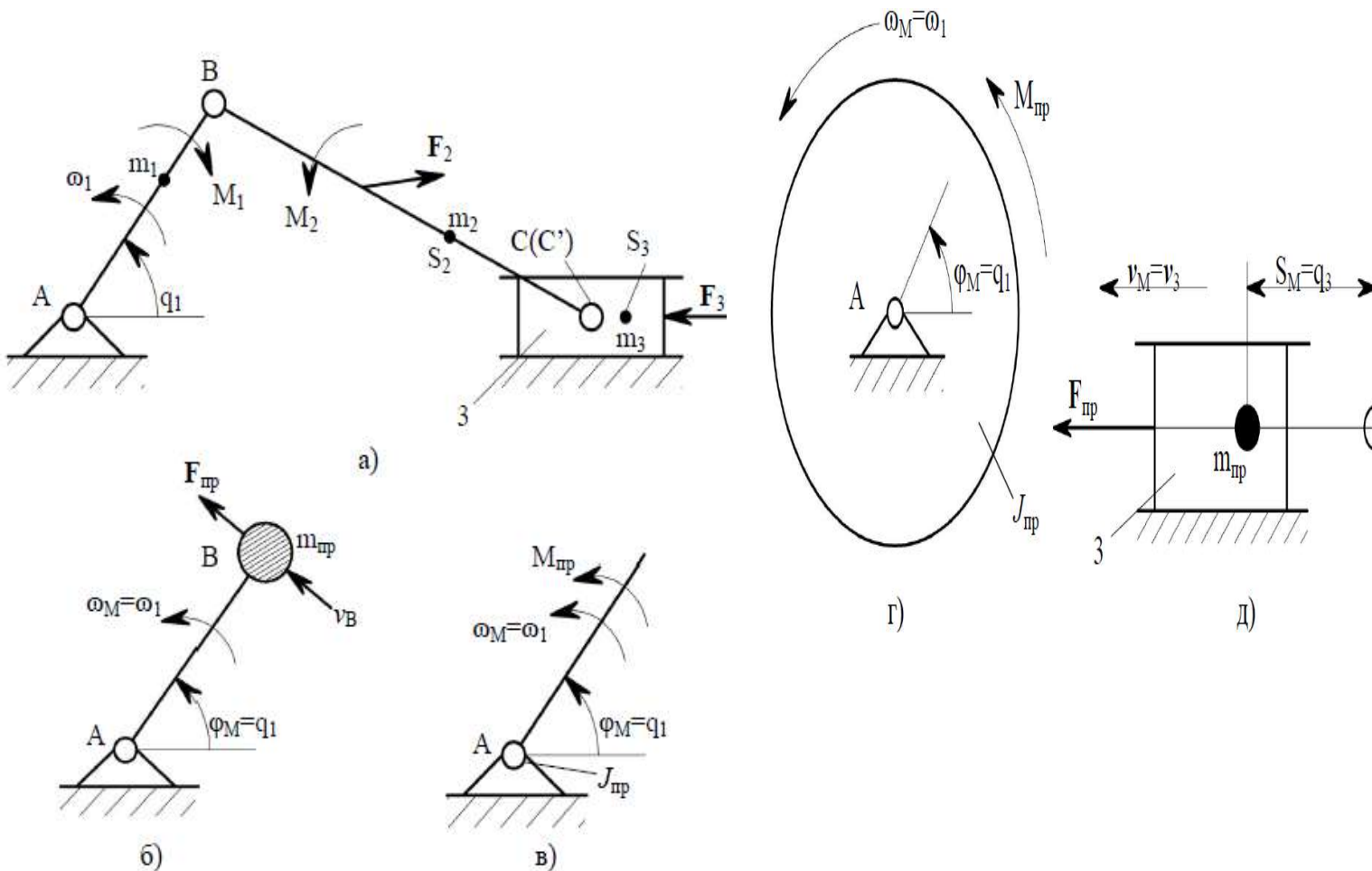
При этом должны выполняться условия: при угловом движении ведущего звена механизма

$$\omega_1 = \omega_M,$$

при линейном движении ведущего звена механизма

$$v_1 = v_M,$$

где ω_1 и v_1 – угловая и линейная скорости ведущего звена механизма соответственно; ω_M и v_M – угловая и линейная скорости звена приведения (модели).



19. Условие кинетостатической определимости кинематических цепей механизмов робототехнических устройств.

условие кинетостатической определимости – условие равенства числа уравнений кинетостатики и числа неизвестных составляющих реакций в кинематических парах.

Невозможность движения вдоль оси дает реакцию в виде силы, а невозможность вращения вокруг оси в виде пары сил. Следовательно, число неизвестных реакций в одной кинематической паре i -го класса равно

$$N = ip_i,$$

во всем механизме

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^5 ip_i$$

где i – класс кинематической пары; p_i – число кинематических пар i -го класса.

Таким образом, условие **кинетостатической определимости пространственной кинематической цепи** имеет вид:

$$6n = \sum_{i=1}^5 ip_i .$$

Это условие совпадает с условием равенства нулю числа подвижностей механизма без избыточных связей и лишних подвижностей, т.е. с условием существования структурной группы:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i = 0.$$

Таким образом, **кинетостатически определимыми кинематическими цепями являются структурные группы.**

Для плоской кинематической цепи условие кинетостатической определимости имеет вид:

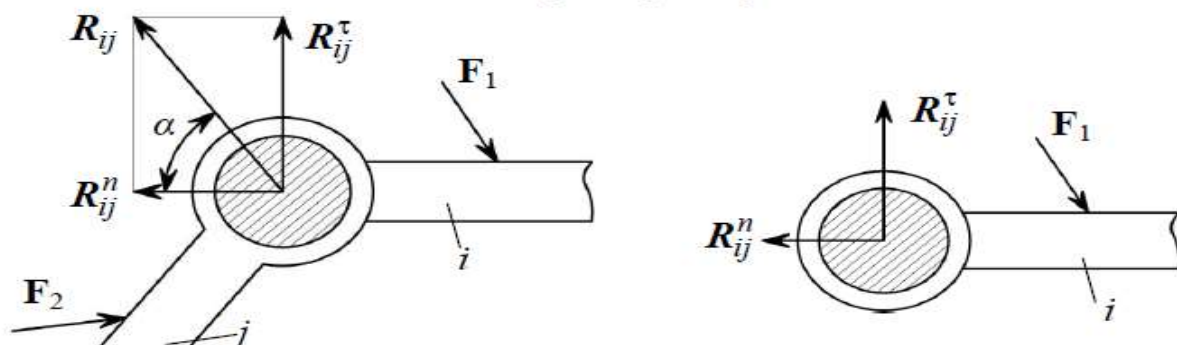
$$3n = \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i .$$

Наличие избыточных связей в механизме увеличивает число неизвестных составляющих реакций в кинематических парах и для их определения дополнительно к уравнениям кинетостатики должны быть составлены **уравнения деформаций.**

20. Силы в кинематических парах робототехнических устройств.

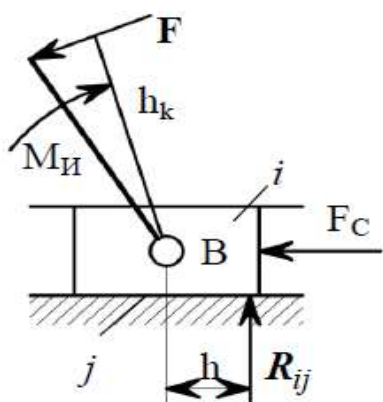
Во вращательной кинематической паре известна точка приложения реакций R_{ij} – центр шарнира, но величина и направление α этой реакции неизвестны (рис. 5.1, а). Поэтому для определения направления реакции ее раскладывают на две составляющие. Разложение по осям произвольное, но выбирают удобную форму: как правило вдоль оси звена (нормальная реакция R_{ij}^n) и перпендикулярно звену (тангенциальная реакция R_{ij}^τ) т.е.

$$R_{ij} = R_{ij}^n + R_{ij}^\tau.$$



В поступательной кинематической паре направление реакции R_{ij} всегда известно – нормаль к опорной поверхности. Величина и точка приложения реакции неизвестны

Точку приложения определяют из уравнения статики для структурной группы (суммы моментов относительно центра B ползуна i) (рис. 5.2):



$$\sum M_B = Fh_k - M_{И} + R_{ij}h = 0,$$

где $M_{И}$ уравновешивающий момент.

Откуда находят плечо приложения реакции опоры R_{ij} :

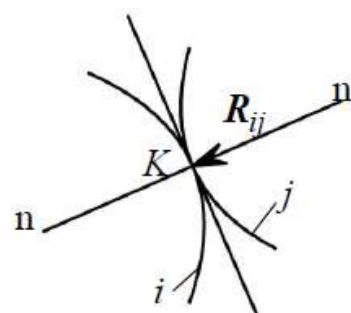
$$h = \frac{M_{И} - Fh_k}{R_{ij}}. \quad (5.5)$$

Если при расчете расстояние h окажется больше длины L -а (L – длина ползуна, a –

Следовательно, в поступательной кинематической паре в общем случае возникают две неизвестные величины h и R_{ij} .

В высшей кинематической паре контакт звеньев осуществляется или в точке или по линии. При точечном контакте силовое взаимодействие представляет собой сосредоточенную силу, при линейном контакте – распределенную нагрузку по линии контакта, которую условно принимают сосредоточенной силой, равнодействующей элементарных распределенных сил.

В высшей кинематической паре известна точка K приложения силы – точка контакта тел, и ее направление – общая нормаль n - n в точке соприкосновения звеньев (рис. 5.4). Величина реакции R_{ij} неизвестна. Ее определяют из условия равновесия одного из контактирующих тел.



21. Расчет износа цилиндрических и сферических кинематических пар.

где $[И]$ – общий допустимый износ. Если ограничена толщина h изнашиваемого слоя контактирующих элементов, то принимают $[И] = h$, если ограничивают допускаемую величину $[\Delta]$ радиального зазора, то

$$[И] = [\Delta] - \Delta ,$$

где Δ – радиальный зазор, мкм;

Диапазон изменения линейной интенсивности изнашивания материалов в различных узлах трения находится в пределах

$$J_h = (10^{-3} \dots 10^{-13}) \frac{\text{МКМ}}{\text{КМ}} .$$
 Для узлов трения механизмов мехатрон-

ных устройств и роботов можно принимать $J_h = 10^{-10} \frac{\text{МКМ}}{\text{КМ}} .$

Цилиндрические и сферические кинематические пары. Ресурс пары скольжения в случае взаимно изнашиваемых элементов, ч [7]:

$$L = \frac{[И]}{(J_{h1}S_1 + J_{h2}S_2)v} , \quad (10.17)$$

где v – число качаний в секунду, с^{-1} ; S_1 и S_2 – пути трения за один цикл качания подвижного элемента, км.

Возможны два случая их определения:

- качается вал и вектор внешней силы неподвижен относительно втулки (рис. 10.2,а) либо качается втулка и вектор силы перемещается (циркулирующая нагрузка) (рис. 10.2, б):

$$S_1 = 2\beta R_2 ; \quad (10.18)$$

$$S_2 = \begin{cases} 2\beta R_1 , & \text{при } 0 < \beta < 2\varphi_0 ; \\ 4\varphi_0 R_1 , & \text{при } 2\varphi_0 \leq \beta < 4\pi - 2\varphi_0 , \end{cases}$$

где β – угловое перемещение (качание) подвижного элемента пары, рад

33. Приведение масс в механизмах роботов.

Приведённой массой $m_{пр}$ механизма называют такую условную массу, которая сосредоточена в точке приведения механизма и кинетическая энергия которой равна сумме кинетических энергий всех его звеньев.

$$m_{пр} = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\frac{v_{Si}}{v_A} \right)^2 + J_{Si} \left(\frac{\omega_i}{v_A} \right)^2 \right]$$

где m_i – масса i -го звена механизма; v_{Si} – скорость центра масс i -го звена; J_{Si} – момент инерции массы i -го звена относительно оси, проходящей через его центр масс; ω_i – угловая скорость i -го звена.

29. Приведение моментов инерции в механизмах роботов.

Приведённым моментом инерции $J_{пр}$ механизма называют такой условный момент инерции звена приведения относительно оси его вращения, при котором это звено обладает кинетической энергией, равной сумме кинетических энергий всех звеньев механизма.

приведённый момент инерции механизма:

$$J_{пр} = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\frac{v_{Si}}{\omega_1} \right)^2 + J_{Si} \left(\frac{\omega_i}{\omega_1} \right)^2 \right].$$

22. Приведение моментов сил в механизмах роботов.

Если ведущее звено совершает поступательное движение, то все силы и моменты сил заменяют приведённой силой.

В случае вращательного движения ведущего звена (звена приведения) более удобным оказывается силы и моменты заменять

приведённым моментом сил $M_{пр}$ где F_i – сила, действующая на i -е звено

$$M_{пр} = \sum_{i=1}^n \left[F_i \frac{v_i}{\omega_1} \cos \left(\hat{F_i v_i} \right) + M_i \frac{\omega_i}{\omega_1} \right].$$

32. Приведение сил в механизмах роботов.

Приведённой силой $F_{пр}$ называют силу, приложенную в точке приведения, работа (или мощность) которой равна работе (или мощности) всех внешних сил и моментов сил, действующих на различные звенья механизма.

приведённая сила будет равна:

$$F_{пр} = \sum_{i=1}^n \left[F_i \frac{v_i}{v_A} \cos \left(\hat{F_i v_i} \right) + M_i \frac{\omega_i}{v_A} \right].$$

38. Силы трения в механизмах роботов.

Сила трения покоя – сила трения, при которой невозможно возникновение относительного движения трущихся тел.

Предельная сила трения покоя – сила трения покоя сколь угодно малое превышение которой приводит к возникновению относительного движения трущихся тел. В случае сухого трения, предельную силу трения покоя определяют по формуле

$$F_{T0} = f_0 F^n, \quad (9.1)$$

где f_0 – коэффициент трения покоя (сцепления), который получают экспериментально для трущихся поверхностей тел из различных материалов; F^n – результирующая сила нормальных давлений на поверхности трения.

Сила трения скольжения – составляющая полной реакции для трущихся тел, лежащая в общей касательной плоскости к поверхностям контакта и направленная в сторону, противоположную их относительному смещению.

$$F_T = f_c F. \quad (9.2)$$

Коэффициент трения скольжения меньше коэффициента трения покоя, т.е. $f_c < f_0$. Значения коэффициента трения скольжения для большинства металлов находятся в пределах от 0,1..0,3.

При качении одного тела относительно другого **силу трения качения** определяют по формуле

$$F_T = f_k F, \quad (9.3)$$

где f_k – коэффициент трения качения, мм. Его значения для различных металлов $f_k = (0,005..0,015)$ мм.

26. Силы трения в поступательной кинематической паре робота.

Трение в поступательной кинематической паре.

Рассмотрим движение тела i относительно тела j под действием внешней силы F , приложенной к телу i под углом α к общей нормали n . Перемещаем эту силу по линии её действия и приложим в точке O контакта тел. В этой точке возникает нормальная сила $F_{ij}^n = F_{ji}^n = F \cos \alpha$, действующая со стороны тела j на тело i , и касательная сила (рис. 9.1)

$$F_{ij}^\tau = F \sin \alpha. \quad (9.4)$$

Эта сила вызывает перемещение тела i со скоростью v_i .

Наличие трения изменяет величину и направление действующих сил. Нормальная сила F_{ij}^n , взаимодействия двух соприкасающихся тел, отклоняется от общей нормали к их поверхности

на угол трения φ не превышающий 6...7 градусов.

В этом случае возникает сила трения

$$F_{tij} = f F_{ij}^n = f F_{ij} \cos \varphi. \quad (9.5)$$

Для осуществления движения тела i необходимо соблюдение условия: $F_{ij}^\tau \geq F_{tij}$.

Откуда следует:

$$\alpha \geq \varphi. \quad (9.10)$$

При $\alpha > \varphi$ движение ускоренное, при $\alpha = \varphi$ движение равномерное, при $\alpha < \varphi$ движение замедленное или тело i остаётся неподвижным

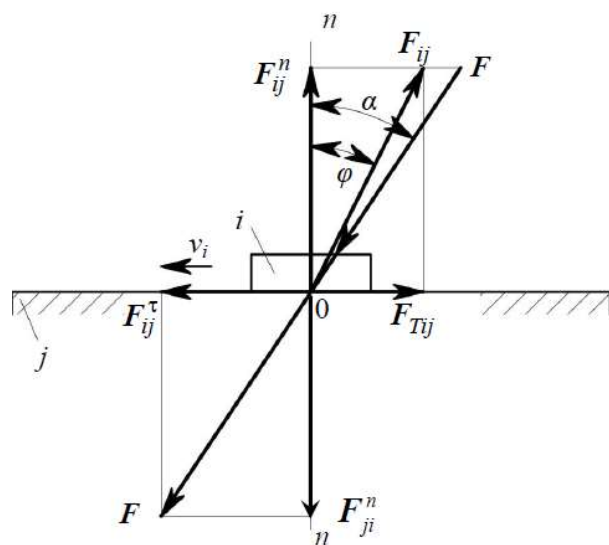


Рис 9.1.

23. Силы трения во вращательной кинематической паре робота.

Наличие трения в кинематической паре приводит к тому, что сила взаимодействия F_{ij}^n отклоняется от нормали $n-n$ на угол трения φ (на рис. 9.2. эта сила обозначена и представляет собой полную реакцию) и проходит по касательной к окружности, центр которой совпадает с центром звена i и радиус которой равен

$$\rho = r_i \sin \varphi, \quad (9.11)$$

где r_i – радиус звена i (цапфы) кинематической пары.

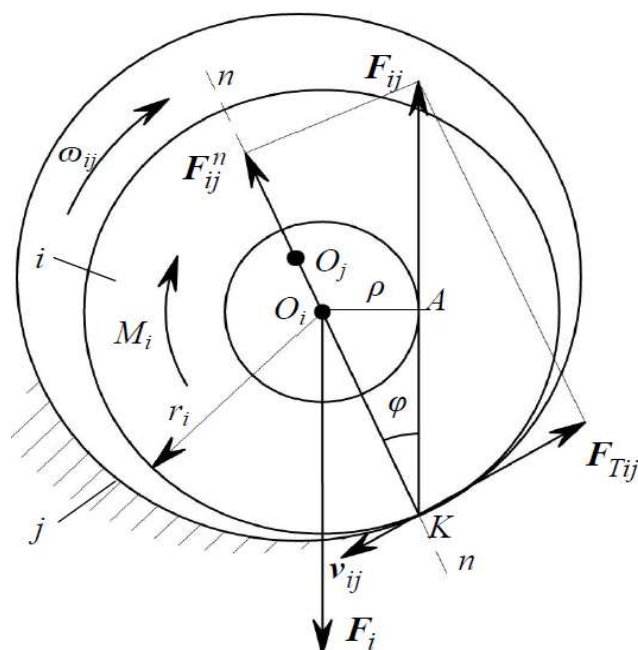
Так как угол трения обычно не превосходит $6..7^\circ$, то $\sin \varphi \approx \tan \varphi = f$. (9.12)

Поэтому принимают

$$\rho = r_i f. \quad (9.13)$$

Величина ρ для данной вращательной пары является константой, не зависящей от сил, действующих на звено i .

Круг радиуса ρ с центром в точке O называют кругом трения, а величину ρ – радиусом круга трения.



Возникшую при этом силу трения F_{Tij} , направленную по касательной к телам в точке их соприкосновения, находят из условия равновесия звена i :

$$M_i = M_T = F_{Tij} r_i = F_{ij} \rho = F_{ij} r_i f. \quad (9.14)$$

Откуда сила трения равна

$$F_{Tij} = \frac{M_i}{r_i}. \quad (9.15)$$

Сила взаимодействия двух тел при наличии трения:

$$F_{ij} = \frac{M_i}{\rho} = \frac{M_i}{r_i f}. \quad (9.16)$$

24. Линейные и угловые скорости и ускорения точек и звеньев механизмов роботов.

Положение конечной точки M выходного (последнего) звена механизма в БСК можно записать в виде:

$$\mathbf{r}_{\text{OM}} = \mathbf{r}_{\text{OM}}(q_1, \dots, q_n), \quad (4.71)$$

где q_k – значение k -й обобщённой координаты; n – число обобщённых координат.

Продифференцировав это выражение, получим вектор линейной скорости точки M в БСК

$$\mathbf{v}_{\text{OM}} = \frac{d\mathbf{r}_{\text{OM}}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_{\text{OM}}}{\partial q_k} \dot{q}_k$$

Если дважды продифференцировать выражение для вектора положения точки M , то получим вектор линейного ускорения конечной точки выходного звена в БСК:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{\text{OM}} &= \frac{d^2 \mathbf{r}_{\text{OM}}}{dt^2} = \frac{d\mathbf{v}_{\text{OM}}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_{\text{OM}}}{\partial q_k} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\partial^2 \mathbf{r}_{\text{OM}}}{\partial q_k^2} \dot{q}_k \dot{q}_s = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_{\text{OM}}}{\partial q_k} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\partial}{\partial q_k} \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{\text{OM}}}{\partial q_s} \right) \dot{q}_k \dot{q}_s. \end{aligned} \quad (4.74)$$

4.3.8. Угловые скорости и ускорения звеньев механизма

Угловую скорость i -го звена механизма относительно $(i-1)$ -й ЛСК можно записать в виде вектора

$$\boldsymbol{\omega}_{i-1,i} = \mathbf{e}_{z(i-1)} \dot{\theta}_i, \quad (4.80)$$

где $\mathbf{e}_{z(i-1)} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ – орт оси z_{i-1} в $(i-1)$ -й ЛСК.

Если обобщённую координату q_i выразить через θ_i и S_i то получим вектор относительной угловой скорости

$$\boldsymbol{\omega}_{i-1,i} = \sigma_i \mathbf{e}_{z(i-1)} \dot{q}_i, \quad (4.81)$$

где

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я кинематическая пара вращательная;} \\ 0, & \text{если } i\text{-я кинематическая пара поступательная.} \end{cases}$$

Угловую скорость i -го звена относительно БСК можно записать в виде вектора

$$\omega_i = A_{-1,0}A_{0,1}A_{1,2} \dots A_{i-2,i-1} \sigma e_{z(i-1)} \dot{q}_i = B_{i-1} \sigma_i e_{z(i-1)} \dot{q}_i, \quad (4.53)$$

где $A_{-1,0}$ – единичная матрица

$$A_{-1,0} = I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.82)$$

B_{i-1} – произведение матриц

$$B_{i-1} = \prod_{j=1}^n A_{i-2,j-1}. \quad (4.83)$$

Абсолютная угловая скорость i -го звена в БСК:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^i \omega_j = \sum_{j=1}^i B_{j-1} \sigma_j e_{z(j-1)} \dot{q}_j. \quad (4.84)$$

Дифференцируя выражение (4.84), получим абсолютное угловое ускорение i -го звена в БСК:

$$E_i = \frac{d\Omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^i B_{j-1} \sigma_j e_{z(j-1)} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i B_{j-1}^k \sigma_j \sigma_k e_{z(j-1)} \dot{q}_j \dot{q}_k, \quad (4.85)$$

где σ_j и σ_k имеют тот же смысл, что и σ_i в выражении (4.81).

25. Линейный износ соприкасающихся тел механизмов роботов.

Линейный износ определяют в виде, мкм,

$$I_h = \int_0^t k p^m v^n dt, \quad (10.5)$$

где p – давление на поверхности трения, МПа; v – скорость относительного движения тел, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; t – время работы узла трения, с; k, m и n – коэффициенты, характеризующие узел трения в заданных условиях его работы. Их предельные значения: $m = 0,5..3,0$; $n = 0,9..1,2$; k – коэффициент линейного износа, принимаемый по опытным данным, $\frac{\text{мкм}}{\text{МПа} \cdot \text{км}}$.

Так как указанные коэффициенты близки к единице, то для упрощения расчётов и с некоторой погрешностью можно принять:

Так как указанные коэффициенты близки к единице, то для упрощения расчётов и с некоторой погрешностью можно принять:

$$I_h = \int_0^t k p v dt = \int_0^t \gamma_h dt, \quad (10.6)$$

где γ_h – скорость изнашивания, $\frac{\text{мкм}}{\text{ч}}$,

$$\gamma_h = k p v. \quad (10.7)$$

При упругопластическом взаимодействии тел (подшипники скольжения, направляющие, ходовые винты), а также при упругом деформировании (зубчатые колёса) принимают $\gamma_h = (2..4) 10^{-4} \frac{\text{мкм}}{\text{ч}}$.

Линейную интенсивность изнашивания можно принять: для неприработанных поверхностей

$$J_h \approx p^{(1,4..3,0)}, \quad (10.8)$$

для приработанных поверхностей

$$J_h \approx p. \quad (10.9)$$

Диапазон изменения линейной интенсивности изнашивания материалов в различных узлах трения находится в пределах $J_h = (10^{-3} ... 10^{-13}) \frac{\text{мкм}}{\text{км}}$. Для узлов трения механизмов мехатрон-

ных устройств и роботов можно принимать $J_h = 10^{-10} \frac{\text{мкм}}{\text{км}}$.

27. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в дифференциальной форме при вращательном движении звена приведения.

$$m_{\text{пр}} \frac{dv}{dt} + \frac{dm_{\text{пр}}}{dS} \frac{v^2}{2} = F_{\text{пр}}. \quad (6.49)$$

Это и есть уравнение движения механизма в дифференциальной форме в случае, когда силы и массы приводятся к точке. Его решают относительно скорости v точки приведения.

Если силы и массы приводятся к звену, то вывод уравнения движения аналогичен предыдущему выводу и его записывают в виде:

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\varphi} \frac{\omega^2}{2} = M_{\text{пр}}. \quad (6.50)$$

Линейное и угловое ускорения можно определить, решив уравнения (6.49) и (6.50) относительно $\frac{dv}{dt}$ и $\frac{d\omega}{dt}$ соответственно:

$$a = \frac{F_{\text{пр}}}{m_{\text{пр}}} - \frac{dm_{\text{пр}}}{dS} \frac{v^2}{2m_{\text{пр}}}; \quad (6.51)$$

34. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в дифференциальной форме при поступательном движении звена приведения.

силы и массы приводятся к точке

$$m_{\text{пр}} \frac{dv}{dt} + \frac{dm_{\text{пр}}}{dS} \frac{v^2}{2} = F_{\text{пр}}. \quad a = \frac{F_{\text{пр}}}{m_{\text{пр}}} - \frac{dm_{\text{пр}}}{dS} \frac{v^2}{2m_{\text{пр}}};$$

Если силы и массы приводятся к звену

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\varphi} \frac{\omega^2}{2} = M_{\text{пр}}. \quad \varepsilon = \frac{M_{\text{пр}}}{J_{\text{пр}}} - \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\varphi} \frac{\omega^2}{2J_{\text{пр}}}.$$

28. Расчет ресурса цилиндрических подшипников скольжения роботов.

Цилиндрические подшипники скольжения. Ресурс работы подшипника скольжения при учёте изнашивания обоих трущихся элементов с интенсивностью J_h , ч [7]:

$$L = \frac{[И]}{(J_{h1}S_1 + J_{h2}S_2)n}, \quad (10.10)$$

где $[И]$ – общий допустимый износ. Если ограничена толщина h изнашиваемого слоя контактирующих элементов, то принимают $[И] = h$, если ограничивают допускаемую величину $[\Delta]$ радиального зазора, то

$$[И] = [\Delta] - \Delta, \quad (10.11)$$

где Δ – радиальный зазор, мкм; n – частота относительного вращения элементов трущихся тел, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$; S_1 и S_2 – пути трения за один оборот подвижного элемента, км. Их определяют из анализа подшипников скольжения.

30. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в энергетической форме при поступательном движении звена приведения.

$$v_A = \sqrt{\frac{2 \int_{S_0}^S F_{\text{пр}} dS}{m_{\text{пр}}} + \frac{m_{\text{пр}0}}{m_{\text{пр}}} v_0^2}.$$

где $F_{\text{пр}}$ – суммарная приведённая сила; dS –элементарное перемещение точки приведения.

31. Уравнение движения механизма робототехнического устройства в энергетической форме при вращательном движении звена приведения.

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{пр}} d\varphi}{J_{\text{пр}}} + \frac{J_{\text{пр}0}}{J_{\text{пр}}} \omega_0^2}.$$

$M_{\text{пр}}$ – суммарный приведённый момент. $d\varphi$ – элементарный угол поворота звена приведения;

35. Виды расчетов износа соприкасающихся тел механизмов роботов.

Рассчитать величину износа очень сложно, так как он зависит от многих факторов: скорости относительного движения, вида деформации (упругая, пластическая, упругопластическая), механических свойств соприкасающихся тел, температуры, и др.

Поэтому расчёт износа проводят по *скорости изнашивания*, $\frac{\text{мкм}}{\text{ч}}$,

$$\gamma_h = \frac{dI_h}{dt} = \frac{\Delta I_h}{\Delta t} \quad (10.1)$$

и *интенсивности изнашивания* [10]:

линейной, $\frac{\text{мкм}}{\text{км}}$,

$$J_h = \frac{I_h}{S}; \quad (10.2)$$

массовой, $\frac{\text{г}}{\text{м}}$,

$$J_m = \frac{I_m}{S}; \quad (10.3)$$

объёмной, $\frac{\text{мм}^3}{\text{м}}$,

$$J_v = \frac{I_v}{S}, \quad (10.4)$$

где I_h – линейный износ в направлении, нормальном к поверхности трения, мкм; I_m – износ по массе, г; I_v – объёмный износ, мм³; S – путь трения, км; Δt – промежуток времени, в течение которого произошёл износ, ч.

Механическое изнашивание – механическое разрушение трущихся поверхностей в результате механического взаимодействия трущихся тел. Оно включает в себя:

- абразивное изнашивание .
- усталостное изнашивание
- эрозионное изнашивание
- изнашивание при заедании

Адгезионное изнашивание – подповерхностное разрушение соприкасающихся поверхностей под воздействием межповерхностных сил, молекулярного сцепления на поверхности раздела, образование адгезионных связей (слипания контактирующих поверхностей разнородных твёрдых тел) между соприкасающимися поверхностями.

Механико-адгезионное изнашивание – разрушение трущихся поверхностей в результате одновременного взаимодействия механических и молекулярных и (или) атомных сил. В результате возникает подповерхностное разрушение трущихся поверхностей, их заедание, появление "холодной сварки", повышение силы трения, увеличение интенсивности изнашивания.

Коррозионное изнашивание – разрушение соприкасающихся поверхностей в результате химического взаимодействия поверхностных слоёв с окружающей средой (кислородом, водой) и электрических процессов, происходящих в них. На контактирующих поверхностях появляются оксидные пленки, продукты взаимодействия металла с кислородом.

Механико-коррозионное изнашивание – поверхностное разрушение соприкасающихся тел, возникающее при трении контактирующих поверхностей, а также в результате их химического и электрического взаимодействия с окружающей средой. На контактирующих поверхностях возникают продукты механического износа (частицы металла), оксидные плёнки, продукты реакций взаимодействия металла с кислородом (увеличивается шероховатость).

Коррозионно-адгезионное изнашивание – подповерхностное и поверхностное разрушение контактирующих поверхностей, возникающее в результате межповерхностных сил, молекулярного сцепления и адгезионных связей, химического и электрического взаимодействия поверхностных слоёв с атмосферой. В результате коррозионно-адгезионного изнашивания возникают спекание соприкасающихся поверхностей, "холодная сварка", оксидные плёнки, продукты взаимодействия металла с кислородом.

Механико-коррозионно-адгезионное изнашивание – это подповерхностное и поверхностное разрушение, возникающее при трении контактирующих поверхностей, а также под воздействием молекулярных и межповерхностных сил, химического и электрического взаимодействия поверхностных слоёв с атмосферой. При этом на соприкасающихся поверхностях возникают все указанные выше виды разрушения. Это наиболее опасный вид разрушения.

Трение – состояние двух соприкасающихся тел, при котором возникает сила, препятствующая их относительному движению, и сопровождающееся рассеиванием механической энергии.

Трение можно классифицировать по следующим признакам [6,10].

1. По воздействию на соприкасающиеся тела:

7. внешнее трение – состояние двух соприкасающихся тел, при котором возникает сопротивление их относительному перемещению, сопровождаемое диссипацией (рассеиванием) энергии;

8. внутреннее трение – процессы, происходящие в твёрдых, жидких и газообразных телах при их деформации, приводящие к рассеиванию механической энергии.

2. По наличию или отсутствию относительного движения тел:

- **трение покоя (статическое трение)** – внешнее трение при относительном покое соприкасающихся тел;

- **трение движения (кинетическое трение)** – внешнее трение при относительном движении соприкасающихся тел.

3. По виду относительного движения тел (кинетического трения):

- **трение скольжения** – внешнее трение при относительном скольжении соприкасающихся тел;

- **трение качения** – внешнее трение при относительном качении соприкасающихся тел;

- **трение верчения** – внешнее трение при вращении одного тела относительно другого вокруг общей нормали к поверхностям их соприкосновения (частный случай трения скольжения);

- **трение качения с проскальзыванием** – внешнее трение при одновременном относительном качении и проскальзывании соприкасающихся тел.

4. По наличию смазочного материала между поверхностями взаимодействующих тел:

- **трение без смазочного материала (сухое трение)** – внешнее трение при отсутствии на поверхностях трения смазочного материала любого вида;

- **трение со смазочным материалом** – внешнее трение при наличии на поверхностях трения смазочного материала любого вида;

Различают следующие виды смазки:

- **твёрдая** – используют твёрдые смазочные материалы (графит, нитрид бора, сульфиды, хлориды, пластмассы, полиамиды, мягкие металлы – Ag, Au, Cu, Co);

- **жидкая** – используют жидкие смазочные материалы (масла);

- **газовая** – используют для разделения трущихся поверхностей газ;

40. Коэффициент полезного действия механизмов роботов

Общий коэффициент полезного действия последовательно соединенных n механизмов равен произведению КПД отдельных механизмов

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i. \quad (6.62)$$

Коэффициент полезного действия можно выразить через средние за цикл значения соответствующих мощностей [10]:

$$\eta = \frac{P_{\Pi}}{P_{\text{Д}}}, \quad (6.57)$$

где P_{Π} – полезная мощность, т.е. мощность на выходном звене механизма:

$$\begin{aligned} P_{\Pi} &= M_{\text{вых}} \omega_{\text{вых}}, \\ P_{\Pi} &= F_{\text{вых}} v_{\text{вых}}. \end{aligned} \quad (6.58)$$

$P_{\text{Д}}$ – подведенная к механизму мощность, т.е. мощность на входном звене механизма:

$$\begin{aligned} P_{\text{Д}} &= M_{\text{вх}} \omega_{\text{вх}}, \\ P_{\text{Д}} &= F_{\text{вх}} v_{\text{вх}}. \end{aligned} \quad (6.59)$$

После подстановки в зависимость (6.57), получим:

$$\eta = \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}} U} = \frac{F_{\text{вых}}}{F_{\text{вх}} U} = \frac{M_{\text{вых}}}{F_{\text{вх}} U} = \frac{F_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}} U}, \quad (6.60)$$

где U – передаточное отношение