

1192 Министерство образования и науки
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет»

Структурный анализ механизмов
Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Теория механизмов и машин» для студентов
специальностей 190600 «Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов»,
190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
190109 «Наземные транспортно-технологические средства»

Воронеж 2016

УДК 621.01
ББК 34.41

Составители В.А. Муравьёв, Р.А. Жилин

Структурный анализ механизмов: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория механизмов и машин» для студентов специальностей 190600 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 190109 «Наземные транспортно-технологические средства» / Воронежский ГАСУ; сост.: В.А. Муравьёв, Р.А. Жилин. – Воронеж, 2016. – 43 с.

В методических указаниях рассматриваются лабораторные работы, выполняемые согласно учебному плану и рабочей программе по курсу «Теория механизмов и машин». Приведены необходимые аналитические зависимости, описываются основные этапы вычислений.

Ил. 24. Табл. 5. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.01
ББК 34.41

*Используется по решению учебно-методического совета
Воронежского ГАСУ*

Рецензент – Ю. И. Калинин, к.т.н., проф. кафедры строительных машин и инженерной механики Воронежского ГАСУ

Введение

Теория механизмов и машин является одной из старейших наук, возникновение и развитие которой обусловлено потребностями практики. Известно, например, что при постройке египетских пирамид применялись простейшие механизмы и механические устройства: рычаги, блоки, наклонная плоскость, однако дальнейшее развитие теории механизмов и машин следует отнести к значительно более поздним временам, когда в результате накопления опыта стали возможными некоторые обобщения и частично выкристаллизовались методы этой науки. В этом смысле временем рождения науки о машинах и механизмах можно считать конец XVIII века. Задачи теории механизмов и машин рассматривались сначала в курсах прикладной механики, выделившейся из состава теоретической механики более 180 лет тому назад. Теория механизмов и машин оформилась как самостоятельная ветвь науки в XX веке.

«Теория механизмов и машин» (ТММ) представляет собой один из важных разделов прикладной механики, в котором изложены методы исследования и построения механизмов и машин. Под исследованием механизмов и машин понимают изучение движения звеньев и их точек. Синтез механизмов представляет собой определение параметров механизмов, машин и приборов по заданным функциям их движения.

Этот курс является фундаментальным в системе подготовки инженеров. Структура и содержание курса предусматривает обязательное последовательное изучение составляющих его разделов при творческой направленности лабораторного практикума и курсового проектирования.

Главная задача выполнения лабораторных работ – научить студентов методам исследования механизмов и машин, умению технически грамотно выполнять измерения и расчёты.

1. Лабораторная работа № 1

Построение кинематических схем плоских и пространственных механизмов

Цель работы – построение кинематических схем.

Объект исследования: модели механизмов.

1.1. Основные понятия и определения

Машина – это устройство, выполняющее механические движения для преобразования энергии, материалов или информации с целью замены или облегчения физического или умственного труда человека.

Технологические машины изменяют форму, размеры, свойства или состояние исходных материалов и заготовок (кузнечно-прессовое оборудование, металлообрабатывающие и деревообрабатывающие станки, литейное оборудование, камнедробилки, мельницы, бетономешалки, прокатные станы, дробеструйные установки и т.п.).

Транспортные машины изменяют положение материалов (различных грузов) в пространстве (конвейеры, краны, автомашины, тепловозы, вертолеты, самолеты, корабли и т.п.).

Энергетические машины преобразуют один вид энергии в другой (электрические двигатели, двигатели внутреннего сгорания, генераторы).

Информационные машины преобразуют вводимую информацию для контроля, регулирования и управления движением.

Машина может иметь в своей структуре один или несколько механизмов.

Механизм – это искусственная система тел, предназначенная для преобразования заданного движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел. По геометрическим и конструктивным признакам различают следующие механизмы: рычажные, зубчатые, фрикционные, с гибкими звеньями, с упругими звеньями, с переменной структурой, с остановками выходного звена, комбинированные, гидравлические, пневматические, с электромагнитными элементами, с электронными элементами.

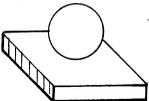
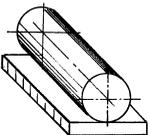
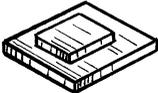
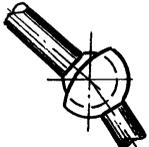
Звеньями называют образующие механизм твердые тела, точки которых не могут иметь относительных перемещений.

Кинематической парой (сокращенно – парой) называют подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев.

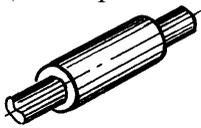
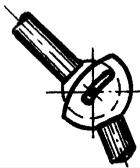
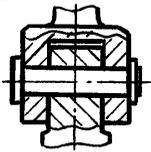
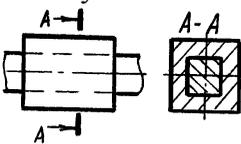
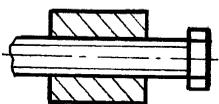
Элементы пары – совокупность поверхностей линий и точек контакта звеньев.

Кинематические пары классифицируются по числу условий связи (ограничений), накладываемых на относительное движение (табл. 1.1), **высшие** пары обеспечивают контакт двух звеньев по линии или в точке, **низшие** – по поверхности.

Таблица 1.1

Изображение кинематических пар	Подвижность	Число степеней свободы	Число условий связи	Класс пары
1	2	3	4	5
Шар-плоскость 	Пяти-подвижная	5	1	1
Цилиндр-плоскость 	Четырех-подвижная	4	2	2
Плоскостная  Сферическая 	Трех-подвижная	3	3	3

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5
<p>Цилиндрическая</p>  <p>Сферическая с пальцем</p> 	<p>Двух- подвижная</p>	<p>2</p>	<p>4</p>	<p>4</p>
<p>Вращательная</p>  <p>Поступательная</p>  <p>Винтовая</p> 	<p>Одно- подвижная</p>	<p>1</p>	<p>5</p>	<p>5</p>

Кинематическая цепь – система звеньев, образующих между собой кинематические пары. В **замкнутой** цепи каждое звено входит не менее, чем в две кинематические пары, и совокупность ее звеньев и пар образует один (**простая** кинематическая цепь) или несколько замкнутых контуров (**сложная** кинематическая цепь). Необходимым признаком сложной кинематической цепи является наличие звена, входящего более, чем в две пары.

Исходя из сказанного, можно дать ещё одно определение механизма. **Механизм** – кинематическая цепь, одно из звеньев которой неподвижно (стойка). Механизм служит для преобразования движения, сообщаемого **входному** звену (звеньям), в требуемое движение **выходного** звена (звеньев). Причем, число входных звеньев равно числу обобщенных координат, однозначно характеризующих положение звеньев кинематической цепи относительно стойки, т. е. числу степеней свободы механизма (W).

При структурном анализе механизмов пользуются их схематичным изображением. Некоторые условные обозначения звеньев, плоских кинематических пар и механизмов представлены на рис. 1.1 и в табл. 1.2.

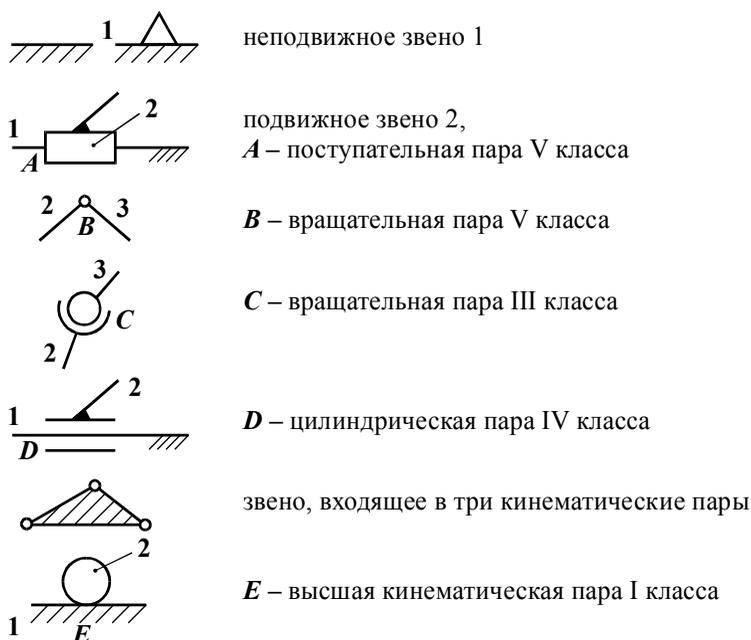
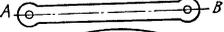
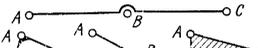
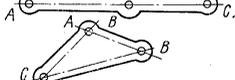
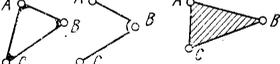
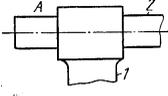
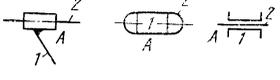
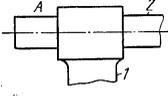
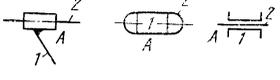
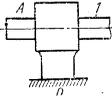
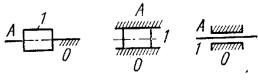
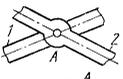
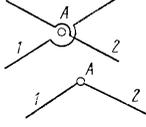
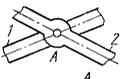
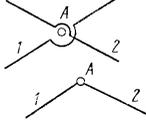
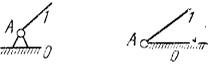
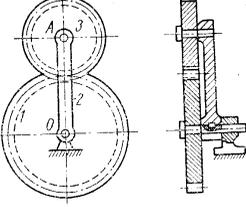
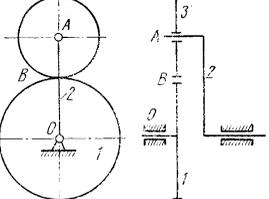


Рис. 1.1. Условные обозначения звеньев и плоских кинематических пар

Таблица 1.2

Условные обозначения звеньев, кинематических пар, механизмов

Наименование	Конструктивное изображение	Схематичное изображение
<p><i>Звено:</i></p>		
<p>Звено входит в две вращательные пары</p>		
<p>звено входит в три вращательные пары</p>		
<p><i>Поступательная пара:</i></p>		
<p>оба звена подвижные</p>		
<p>одно звено неподвижно</p>		
<p><i>Вращательная пара:</i></p>		
<p>оба звена подвижные</p>		
<p>одно звено неподвижно</p>		
<p>Дифференциальный зубчатый механизм</p>		

Схемы наиболее распространенных плоских механизмов показаны на рис. 1.2. Примеры схем пространственных механизмов показаны на рис. 1.3.

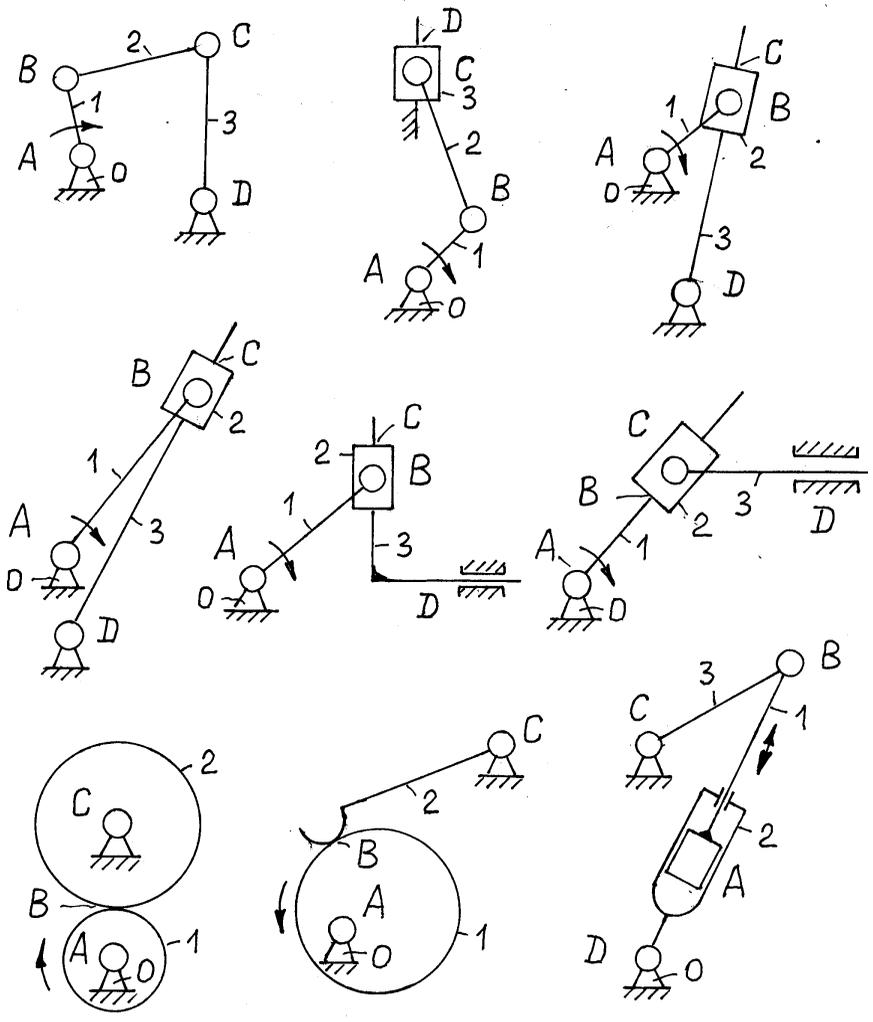


Рис. 1.2. Схемы плоских механизмов:

- а) кривошипно-коромыслового; б) кривошипно-ползунного; в) кулисного с качающейся кулисой; г) кулисного с вращающейся кулисой; д) синусного; е) тангенсного; ж) трехзвенного зубчатого цилиндрического; з) кулачково-коромыслового; и) кулисного с ведущим поршнем на шатуне

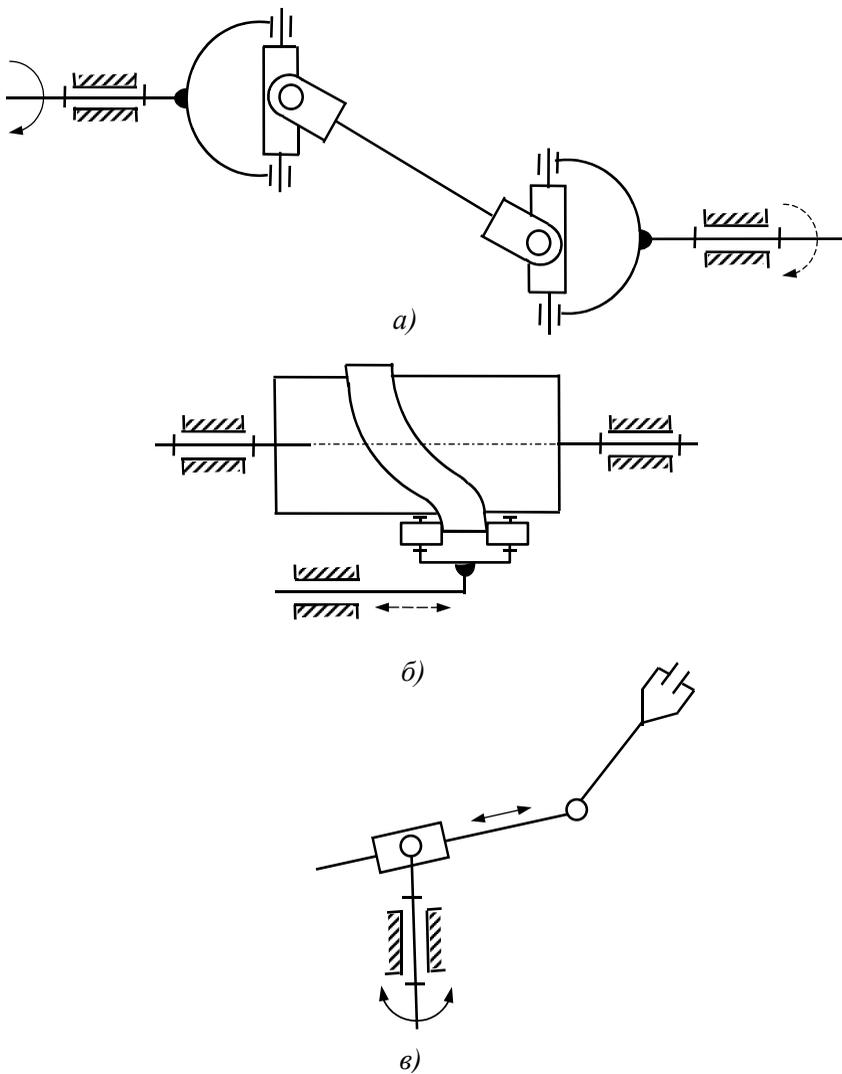


Рис. 1.3. Схемы пространственных механизмов: а) механизма двойного универсального шарнира (карданова шарнира); б) кулачкового механизма; в) манипулятора

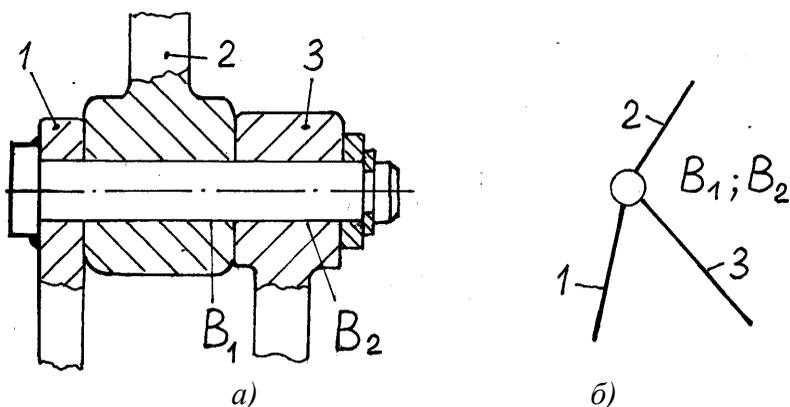


Рис. 1.4. Шарнирное соединение трех звеньев в двух совмещенных вращательных кинематических парах (шарнирах): а) конструктивное изображение; б) изображение на схеме

Все необходимые размеры звеньев механизма откладывают в некотором выбранном масштабе длин μ_ℓ (м/мм), который означает, что один миллиметр звена на схеме соответствует μ_ℓ метрам природы.

Например, масштаб $\mu_\ell = 0,001$ м/мм означает, что один миллиметр звена на кинематической схеме механизма соответствует 0,001 м природы, или одному миллиметру природы. То есть этот масштаб соответствует стандартному чертежному масштабу М 1: 1.

1.2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с предложенными плоскими и пространственными механизмами.
2. Определить классы кинематических пар механизма. Определить количество звеньев механизма и звено, являющееся стойкой. Определить длины звеньев заданной модели механизма. Длина звеньев замеряется (в метрах) между центрами кинематических пар.
3. Выбрать масштаб μ_ℓ (м/мм) кинематической схемы и определить длины звеньев (в миллиметрах) в этом масштабе. Схема механизма должна занять всю тетрадную страницу.

4. Начертить кинематическую схему механизма. Изобразить элементы кинематических пар, принадлежащие стойке. Изобразить ведущее (входное) звено, на демонстрационной модели именно это звено приводится в движение от рукоятки. Этому звену необходимо присвоить номер 1, а стойке номер 0. Положение ведущего звена выбрать таким, чтобы отсутствовало пересечение или наложение остальных звеньев. Указать направление движения ведущего звена. Используя метод засечек, показать положение остальных звеньев механизма, присвоив каждому звену номер. Обозначить на схеме заглавными буквами латинского алфавита все кинематические пары.
5. Указать название каждого звена механизма, учитывая вид движения этого звена.

1.3. Пример выполнения

Дана модель шестизвенного плоского кулисного механизма (рис. 1.5, а). Задание выполняем в следующей последовательности.

1) Устанавливаем подвижные элементы модели в положение, для которого будет строиться кинематическая схема. Если положение механизма предварительно не задано, то следует выбрать такое взаимное расположение звеньев, при котором отсутствовало бы их пересечение или наложение.

2) Измеряем постоянные истинные длины звеньев, необходимые для построения кинематической схемы механизма: $l_{AE} = 0,1\text{м}$; $l_{AB} = 0,08\text{м}$; $l_{DF} = 0,22\text{м}$; $l_{DE} = 0,05\text{м}$.

3) Принимаем на схеме $AE = 25\text{мм}$. Тогда масштаб кинематической схемы механизма будет:

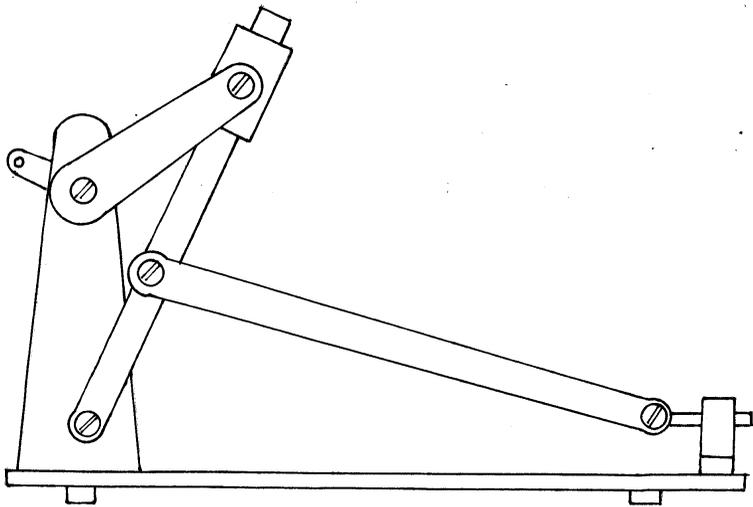
$$\mu_\ell = l_{AE} / AE = 0,1 / 25 = 0,004\text{м} / \text{мм}.$$

Длины других звеньев в этом масштабе:

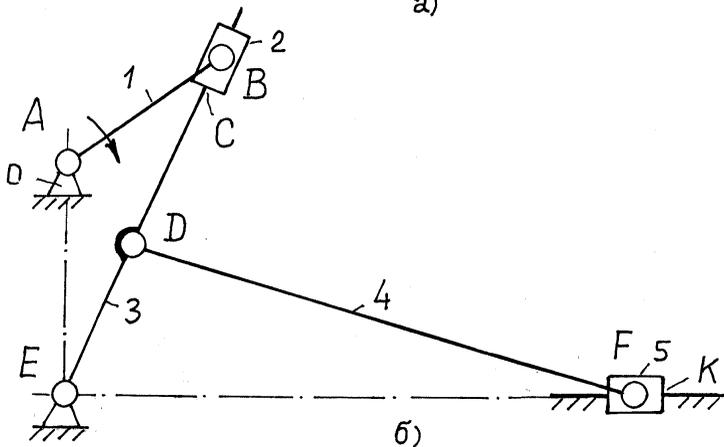
$$AB = l_{AB} / \mu_\ell = 0,08 / 0,004 = 20\text{мм};$$

$$DE = l_{DE} / \mu_\ell = 0,05 / 0,004 = 12,5\text{мм};$$

$$DF = l_{DF} / \mu_\ell = 0,22 / 0,004 = 55\text{мм}.$$



а)



б)

Рис. 1.5. Шестизвенный плоский кулисный механизм:
а) демонстрационная модель; б) кинематическая схема

4) Начинаем построение кинематической схемы механизма. Вначале на вертикали откладываем принятое расстояние AE между элементами стойки (рис. 9, б). Выбираем произвольно положение ведущего звена AB и изображаем его в масштабе. Проводим прямую линию звена EC и изображаем ползун 2. Откладывая расстояние ED , получаем положение

шарнира D . Положение точки F находим, используя метод засечек: через точку E проводим горизонталь, затем, устанавливая ножку циркуля в точку D , проводим дугу радиусом DF до пересечения ее с этой горизонталью. На схеме указываем номера всех звеньев и обозначаем все кинематические пары буквами.

5) Устанавливаем названия звеньев механизма: 0 – стойка, 1 – кривошип, 2 – ползун, 3 – кулиса, 4 – шатун, 5 – ползун.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое механизм, звено, кинематическая пара, кинематическая цепь, структурная схема?
2. Чем определяется класс пар?
3. какие кинематические пары называются высшими, а какие низшими?
4. Существует ли однозначная связь между классом кинематической пары и тем является ли она высшей или низшей?
5. Как и с какой целью составляется кинематическая схема механизма?
6. Чем отличается кинематическая цепь от механизма?

2. Лабораторная работа № 2

Определение степени подвижности механизма

Цель работы – определение степени подвижности механизма.

Объект исследования: модели механизмов.

2.1. Основные понятия и определения

Если на звено не наложено никаких условий связи, то оно в пространстве имеет шесть степеней свободы. N звеньев, не соединенных кинематическими парами, имеет $6N$ степеней свободы или $6n$ независимых движений.

Соединим N звеньев парами I, II, III, IV, V классов.

Пусть количество пар: I класса = P_1 ; II класса = P_2 ; III класса = P_3 ; IV класса = P_4 ; V класса = P_5

Известно, что в зависимости от класса кинематической пары, на относительное движение звеньев налагается определенное число условий связи, т.е. ограничений движения. Общее число условий связи, налагаемое всеми парами будет:

$$5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1.$$

Число же степеней свободы кинематической цепи

$$H = 6N - (5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1).$$

Если одно звено этой цепи обратим в стойку, тогда число степеней свободы всей цепи уменьшится на шесть, т.е. $H - 6 = W$ – число степеней свободы кинематической цепи относительно стойки, т.е. степень подвижности механизма.

$$W = 6N - 6 - (5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1);$$

$$W = 6(N - 1) - (5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1);$$

где W – число степеней свободы кинематической цепи относительно стойки, N – число звеньев.

Если обозначить число подвижных звеньев через $n = N - 1$, тогда получим выражение, выведенное в 1897 году Сомовым и несколько изменено Малышевым в 1923 году, получившее название *формула Сомова-Малышева для пространственной цепи*.

$$W = 6n - (5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1). \quad (2.1)$$

Механизм представляет собой кинематическую цепь, звенья которой совершают вполне определенные движения. Как же связана *определенность движения* звеньев механизма со степенью свободы?

Степень свободы $W=1$ означает, что одному звену механизма можно предписать определенный независимый закон движения, т.е. задать одну обобщенную координату. Все остальные подвижные звенья будут совершать определенные движения.

Обобщенные координаты механизма – это независимые между собой координаты, определяющие положение всех звеньев механизма относительно стойки.

Звено, которому предписан определенный закон движения (задана обобщенная координата) называется ведущим или начальным звеном. Часто ведущее звено является входным. Число степеней свободы определяет количество ведущих звеньев или обобщенных координат. Ведущим звеном может быть одно или несколько звеньев (промышленные роботы имеют 6–8 степеней подвижности).

Для пространственного механизма степень подвижности возможно определить по формуле Сомова-Малышева. Если же на движение звеньев механизма наложены общие условия связи, т.е. дополнительные требования, то это сказывается на характере движения звеньев и, следовательно, изменится структурная формула подвижности механизма.

Для преобразования движения входных звеньев, совершаемых в одной плоскости в движение выходного звена в той же плоскости достаточно использовать плоские механизмы, все звенья которых перемещаются в одной (или параллельных) плоскостях, а на подвижность звеньев вне этой плоскости наложены три общих ограничения. В этих механизмах отсутствуют кинематические пары 1-го, 2-го и 3-го классов. При условии, что оси всех кинематических пар параллельны (идеально плоский механизм), степень подвижности W определяется:

$$W = (6 - 3) \times n - (5 - 3) \times P_5 - (4 - 3) \times P_4.$$

или
$$W = 3n - 2P_5 - P_4. \quad (2.2)$$

где: n – число подвижных звеньев; P_5 – число пар 5-го класса; P_4 – число пар 4-го класса.

Это выражение, определяющее степень подвижности плоского механизма, выведено Пафнутием Львовичем Чебышевым в 1869 году и носит название «формула Чебышева».

В механизмах существуют степени подвижности и условия связи, которые не влияют на характер движения звеньев.

Такие степени подвижности являются *лишними*, а условия связи – *избыточными*.

Избыточные связи в идеально плоском механизме возникают в результате использования в каждой кинематической паре большего, чем необходимо для геометрической связи, числа элементов – **локальные избыточные связи** (рис. 2.1), а так же применение большего, чем необходимо для передачи движения, количества подвижных звеньев, т.е. **дополнительных звеньев** (рис. 2.2).

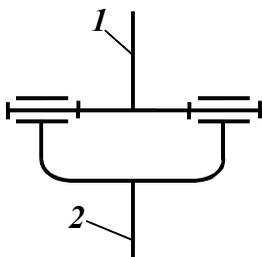


Рис. 2.1

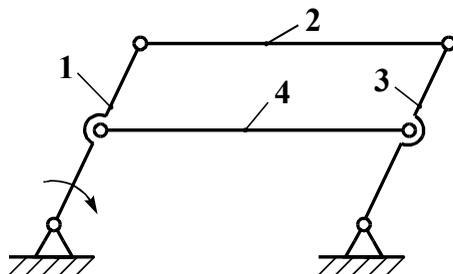


Рис. 2.2

Излишние (дополнительные) подвижности, не влияющие на подвижность выходного звена в кинематической цепи, могут иметь отдельные звенья (**местная излишняя подвижность**) механизма (рис. 2.3) или часть звеньев (**групповая излишняя подвижность**) механизма.

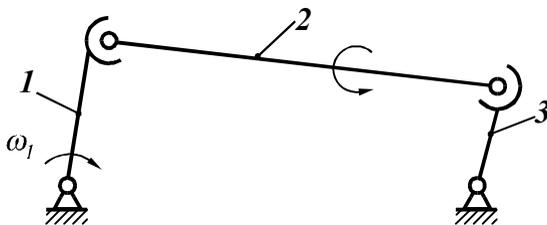


Рис. 2.3

В кулачковом механизме (рис. 2.4) возможность ролика 2 поворачиваться вокруг своей оси C является лишней степенью подвижности. Если профиль кулачка увеличить на величину

радиуса ролика (штриховая линия), а ролик 2 с кинематической парой C удалить, то кинематика механизма не изменяется.

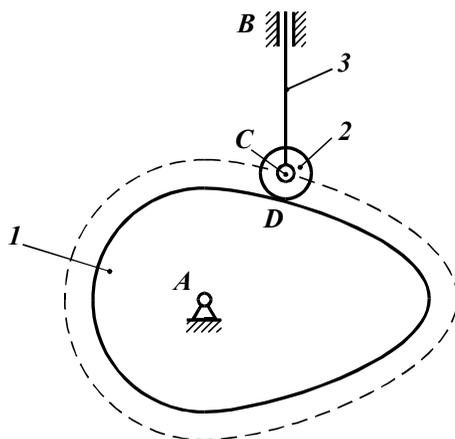


Рис. 2.4. Схема кулачкового механизма

При вычислении степени подвижности механизма пассивные связи и лишние степени свободы не учитываются.

Степень подвижности механизма может быть равна или быть больше единицы. Степень подвижности соответствует количеству ведущих звеньев механизма и указывает число обобщённых координат, необходимых для однозначного определения движения остальных подвижных звеньев относительно стойки.

2.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить кинематическую схему выданного механизма. Определить длины звеньев в выбранном масштабе μ_l (м/мм). Изобразить элементы кинематических пар, принадлежащие стойке. Присвоить ведущему звену номер 1, пронумеровать остальные звенья механизма. Обозначить на схеме заглавными буквами латинского алфавита все кинематические пары.
2. Выявить наличие пассивных связей и лишние степени подвижности.
3. Определить степень подвижности механизма по структурной формуле соответствующего семейства.

2.3. Пример выполнения

Дана модель шестизвенного плоского кулисного механизма (рис. 2.5). Задание выполняем в следующей последовательности.

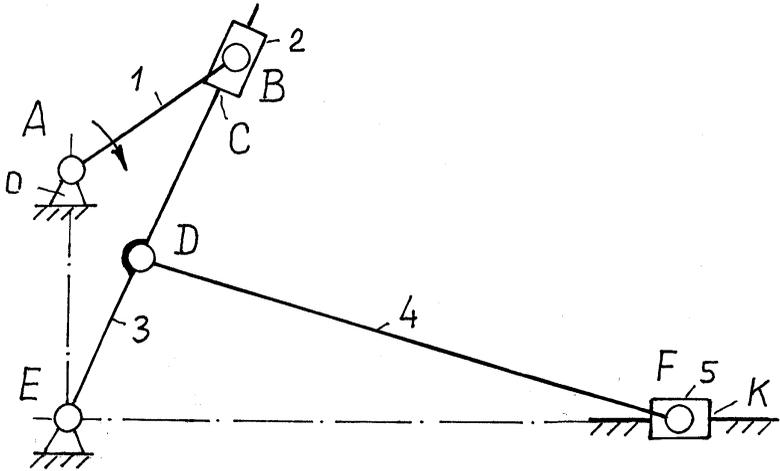


Рис. 2.5. Кинематическая схема шестизвенного плоского кулисный механизма

1. Строим схему выданного механизма. Устанавливаем подвижные элементы модели в положение, для которого будет строиться кинематическая схема. Строим кинематическую схему механизма. На схеме указываем номера всех звеньев и обозначаем все кинематические пары буквами.

Измеряем постоянные истинные длины звеньев, необходимые для построения кинематической схемы механизма: $l_{AE} = 0,1\text{м}$; $l_{AB} = 0,08\text{м}$; $l_{DF} = 0,22\text{м}$; $l_{DE} = 0,05\text{м}$.

Принимаем на схеме $AE = 25\text{мм}$. Тогда масштаб кинематической схемы механизма будет:

$$\mu_l = l_{AE} / AE = 0,1 / 25 = 0,004\text{м} / \text{мм}.$$

Длины других звеньев в этом масштабе:

$$AB = l_{AB} / \mu_l = 0,08 / 0,004 = 20\text{мм};$$

$$DE = \ell_{DE} / \mu_\ell = 0,05 / 0,004 = 12,5 \text{ мм};$$

$$DF = \ell_{DF} / \mu_\ell = 0,22 / 0,004 = 55 \text{ мм}.$$

2. В механизме пассивные связи и лишние степени подвижности не выявлены.

3. Вычисляем степень подвижности W механизма по формуле П. Л. Чебышева (2.2). Согласно кинематической схеме механизма

$$n = 5, P_5 = 7 (A, B, C, D, E, F, K), P_4 = 0.$$

Тогда

$$W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1.$$

Степень подвижности механизма равна единицы. Требуется одна обобщённая координата для задания движения всех звеньев.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое механизм, звено, кинематическая пара, кинематическая цепь, структурная схема?
2. Чем определяется класс пар?
3. Какие кинематические пары называются высшими, а какие низшими?
4. Существует ли однозначная связь между классом кинематической пары и тем, является ли она высшей или низшей?
5. Зачем определять число степеней подвижности механизмов?
6. Чем отличается кинематическая цепь от механизма?
7. Как и с какой целью составляется кинематическая схема механизма?
8. Как определить число степеней подвижности W плоских механизмов относительно стойки?
9. Зачем определять число степеней подвижности механизмов?
10. С какой целью в механизмы вводят лишние степени подвижности и пассивные связи?
11. Как определить имеются ли пассивные звенья и лишние степени подвижности в механизмах?

3. Лабораторная работа № 3 Замена в плоских механизмах высших кинематических пар низшими

Цель работы – построение заменяющей кинематической схемы механизма.

Объект исследования: модели механизмов.

3.1. Основные понятия и определения

Кинематическая пара четвертого класса обеспечивает две степени подвижности в относительном движении звеньев. Данное относительное движение имеет сложный характер, которое включает в себя два взаимосвязанных простых движения.

В то же время низшая пара пятого класса обеспечивает простейшее относительное движение – вращательное или поступательное (эти два вида движения хорошо изучены и для их анализа разработаны относительно простые методы). Таким образом, с точки зрения методов исследования работы механизма, удобнее иметь дело с низшими кинематическими парами пятого класса.

Оказывается, что для рассматриваемого момента времени, высшие пары четвертого класса можно заменить эквивалентными с точки зрения работы механизма цепями с низшими парами пятого класса. При этом необходимо выполнить следующие условия:

- число степеней подвижности механизма при замене не должно изменяться;
- характер мгновенного относительного движения звеньев также должен оставаться прежним.

Для выполнения этих условий замена производится в следующем порядке:

- проводится общая нормаль к соприкасающимся профилям, составляющим высшую пару, в точке их контакта;
- определяется положение центров кривизны этих профилей в данной точке контакта и в каждом центре кривизны ставится шарнир;

- указанные шарниры соединяются жестким стержнем, в результате формируется фиктивное звено, которое в заданном механизме отсутствует;

- фиктивное (заменяющее) звено указанными выше шарнирами присоединяется к тем звеньям механизма, которые входят в заменяемую высшую пару.

Каждая замена справедлива для данного мгновенного положения механизма. В другом положении замена будет аналогичной, но размеры звеньев заменяющей цепи изменятся, т.к. изменятся радиусы кривизны профилей в новой точке контакта. Поэтому данный искусственный прием может использоваться только как метод исследования механизмов, но не как метод их проектирования.

Рассмотрим механизм из двух подвижных звеньев (Рис. 3.1).

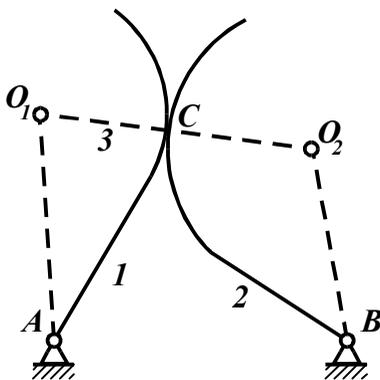


Рис. 3.1. Механизм из двух подвижных звеньев с двумя парами 5-го класса и одной парой 4-го класса

Здесь две пары 5-го класса A и B и одна пара 4-го класса – высшая (точка C контакт звеньев 1 и 2). Степень подвижности данного плоского механизма П. Л. Чебышева (2.2)

$$W = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1.$$

Покажем, что этот механизм может быть заменен шарнирным четырехзвенником (Рис. 3.2).

В точке касания профилей проводится нормаль к ним, на которой находятся центры кривизны O_1 и O_2 кривых, образующих эти профили. Точки O_1 и O_2 обозначают центры шарниров, которые затем соединяются фиктивным (заменяющим) звеном 3 (рис. 3.1). Если же один из соприкасающихся профилей представляет собой прямую, то тогда вращательная пара представляется поступательной. Оба предъявляемые требования к заменяющему механизму выполняются.

Величина фиктивного звена O_1O_2 равна расстоянию между центрами кривизны элементов высшей пары:

$$O_1O_2 = \rho_1 + \rho_2,$$

где ρ_1 и ρ_2 – радиусы кривизны касающихся поверхностей звеньев 1 и 2.

Механизм AO_1O_2B является заменяющим со степенью подвижности

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1.$$

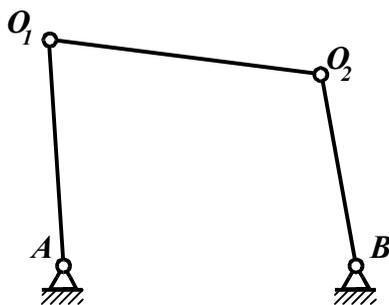


Рис. 3.2. Схема заменяющего механизма

Замена высшей кинематической пары в зубчатом зацеплении колёс проводится в следующем порядке.

Пусть имеется два зубчатых колеса, входящих в зацепление (Рис. 3.3). Меньшее зубчатое колесо вращается против, а большее по часовой стрелке.

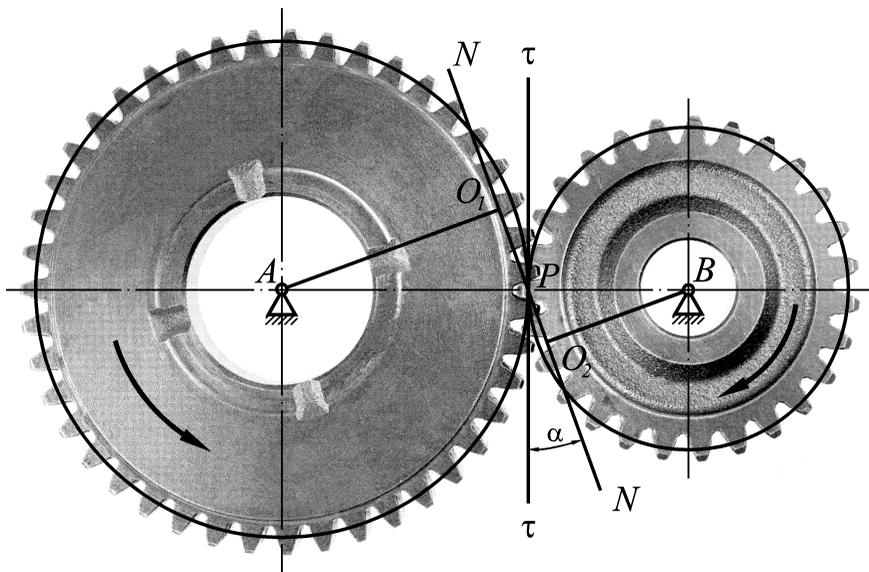


Рис. 3.3. Зубчатая передача

В точках A и B две кинематические пары 5-го класса и одна высшая пара 4-го класса в точке зацепления P . Положение точки P находится в месте касания начальных окружностей обоих зубчатых колёс.

Степень подвижности механизма

$$W = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1.$$

Проведём через полюс зацепления P касательную $\tau\text{-}\tau$ к зубчатым колёсам. Проведём линию $N\text{-}N$ под углом $\alpha = 20^\circ$ (стандартный угол зацепления) к общей касательной. Угол откладывается в сторону противоположную движению ведущего зубчатого колёса. Полученная линия $N\text{-}N$ является линией зацепления. Из центров вращения зубчатых колёс A и B опускаем на неё перпендикуляры – отрезки AO_1 и BO_2 . Отрезки перпендикуляров к линии зацепления (AO_1 и BO_2) являются радиусами ос-

новых окружностей. Механизм AO_1O_2B является заменяющим (Рис. 3.4).

Степень подвижности заменяющего механизма

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1.$$

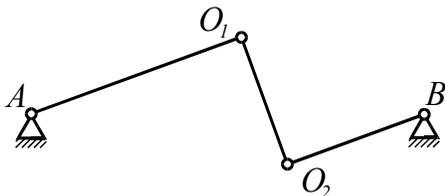


Рис. 3.4. Схема заменяющего механизма

3.2. Некоторые частные случаи замены высших пар

Высшая пара образована звеньями, одно из которых представляет собой произвольную кривую, а со стороны другого имеется точечный контакт. При точечном контакте радиус кривизны элемента пары равен нулю (условная вращательная пара ставится в точку контакта) (рис. 3.5, а).

Высшая пара образована элементами, один из которых представляет собой произвольную кривую, а со стороны другого имеется контакт по линии. В данном случае вращательная пара представляется поступательной (рис. 3.5, б).

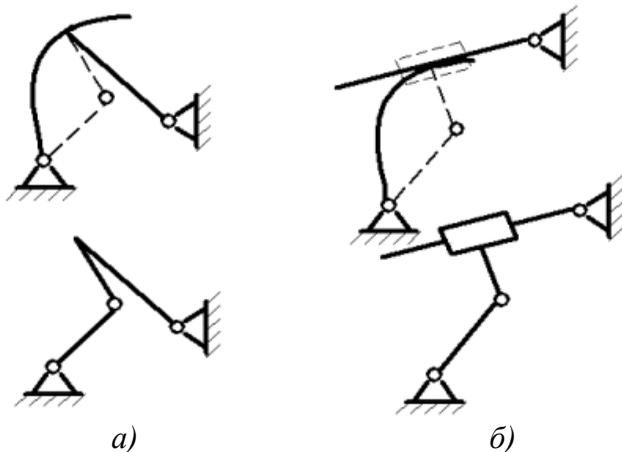


Рис. 3.5. Частные случаи замены высших пар низшими

3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с предложенными плоскими и пространственными механизмами. Найти степень подвижности механизма.
2. Определить классы кинематических пар механизма, количество звеньев механизма и звено, являющееся стойкой. Измерить число зубьев каждого колёса, межосевое расстояние. Определить передаточное отношение.
3. Выбрать масштаб μ_ℓ (м/мм) кинематической схемы и найти длины звеньев в этом масштабе.
4. Начертить кинематическую схему механизма. Изобразить элементы кинематических пар, принадлежащие стойке. Изобразить ведущее (входное) звено, указать направление его движения. Нанести положение остальных звеньев механизма, присвоив каждому звену номер. Обозначить на схеме заглавными буквами латинского алфавита все кинематические пары.
5. Провести замену высшей кинематической пары одним фиктивным звеном и двумя низшими парами.
6. Изобразить заменяющий механизм поверх кинематической схемы исследуемого механизма.
7. Определить степень подвижности заменяющего механизма. Число степеней подвижности при замене не должно изменяться.

3.4. Пример выполнения

1. Дана модель зубчатого механизма (рис. 3.6) со степенью подвижности

$$W = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1.$$

2. Находим число зубьев каждого колёса: $z_1 = 27$, $z_2 = 43$. Измерим межосевое расстояние $a_w = 175$ мм. Определим передаточное отношение

$$U = \frac{z_2}{z_1} = \frac{43}{27} = 1,59$$

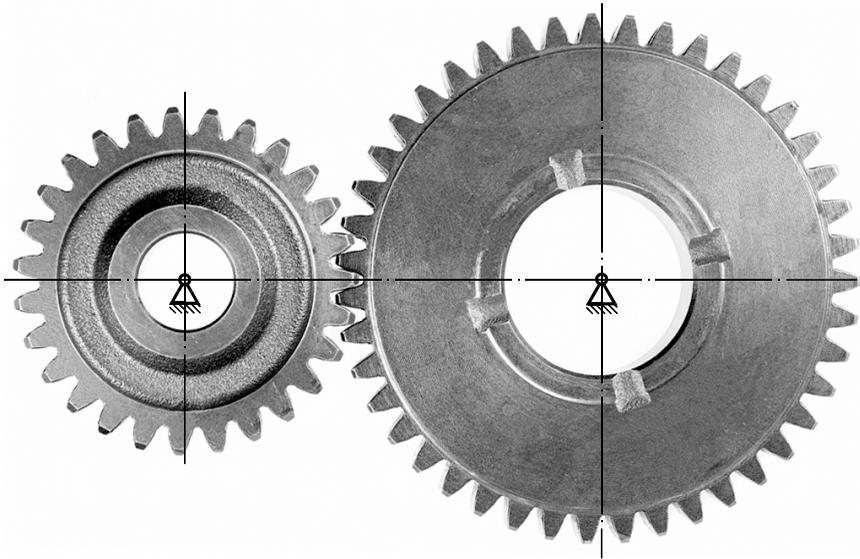


Рис. 3.6. Трёхзвенный зубчатый механизм

Диаметр начальных (делительных) окружностей:

$$d_{w1} = \frac{2a_w}{U+1} = \frac{2 \cdot 175}{1,59+1} = 135,1 \approx 135 \text{ мм}$$

$$d_{w2} = d_{w1} U = 135,1 \cdot 1,59 = 214,65 \approx 215 \text{ мм}$$

или

$$d_{w2} = 2 \cdot a_w - d_{w1} = 2 \cdot 175 - 135 = 215 \text{ мм}$$

3. Принимаем масштаб кинематической схемы механизма:

$$\mu_l = 2 \text{ мм/мм}$$

Тогда в этом масштабе:

межосевое расстояние $a_w = 175 / 2 = 87,5 \text{ мм}$;

диаметры начальных окружностей:

$$d_{w1} = 135 / 2 = 67,5 \text{ мм};$$

$$d_{w2} = 215 / 2 = 107,5 \text{ мм.}$$

4. Начинаем построение кинематической схемы механизма. Выбираем произвольное положение точки A . По горизонтали откладываем межосевое расстояние a_w до точки B (рис. 3.7). Из точки A проводим окружность диаметром d_{w1} , а из точки B окружность диаметром d_{w2} .

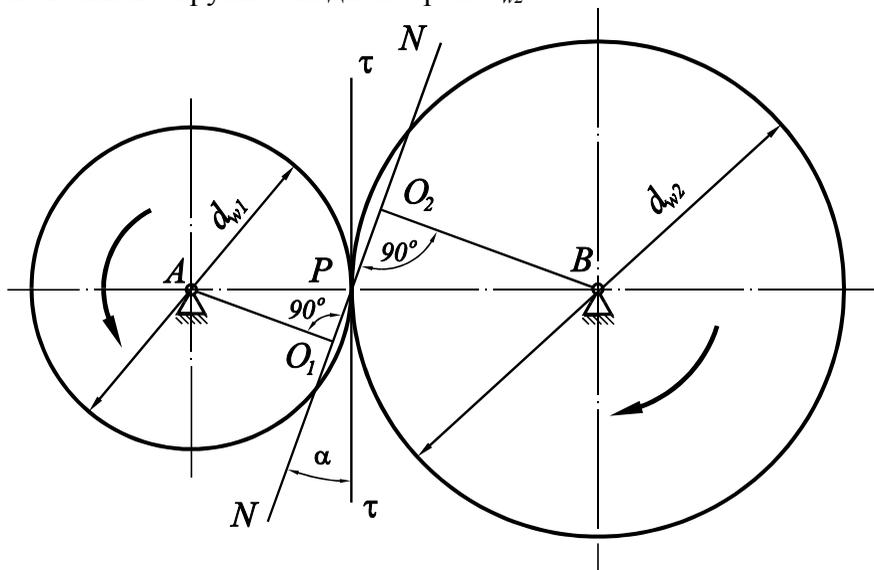


Рис. 3.7. Схема трёхзвенного зубчатого механизма

5) Начинаем построение замещающего механизма.

Проведём через полюс зацепления P касательную $\tau\text{--}\tau$ к окружностям d_{w1} и d_{w2} . Построим линию зацепления $N\text{--}N$, поворачивая вокруг точки P на угол $\alpha = 20^\circ$ общую касательную $\tau\text{--}\tau$ в сторону, противоположную направлению движению ведущего зубчатого колеса z_1 .

Из центров вращения A и B опускаем на неё перпендикуляры до пересечения с линией зацепления. Отметим точки O_1 и O_2 .

Величина отрезков

$$AO_1 \approx 63 \text{ мм}$$

$$BO_2 \approx 101 \text{ мм}$$

Отрезки перпендикуляров к линии зацепления (AO_1 и BO_2) являются радиусами основных окружностей. Их величина

$$r_{b1} = AO_1 \cdot \mu_\ell = 32 \cdot 2 = 64 \text{ мм}$$

$$r_{b2} = BO_2 \cdot \mu_\ell = 50,5 \cdot 2 = 101 \text{ мм}$$

6) Механизм AO_1O_2B является заменяющим (рис. 3.8).

Степень подвижности заменяющего механизма

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1.$$

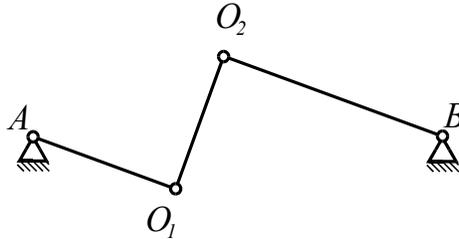


Рис. 3.8

7) Число степеней подвижности исходного и заменяющего механизма не изменилось, характер мгновенного относительного движения звеньев остался прежним.

Вопросы для самопроверки

1. Зачем высшие пары заменяют низшими?
2. Как производится замена высших кинематических пар низшими?
3. Какие условия необходимо выполнить при построении заменяющего механизма?
4. Приведите общий алгоритм построения заменяющего механизма.
5. Как определяется длина заменяющего звена?
6. С какой целью, и каким образом строится схема заменяющего механизма?
7. Что называется радиусом кривизны плоской кривой в данной точке?

4. Лабораторная работа № 4

Структурный анализ плоских (пространственных) механизмов

Цель работы – определение структуры и класса механизма по кинематической схеме.

Объект исследования: модели механизмов.

4.1. Основные понятия и определения

Рациональная классификация должна разделять все механизмы на такие группы, каждая из которых отличалась бы единством методов структурного, кинематического и кинестатического исследования. Этим требованиям отвечает научно обоснованная структурная классификация плоских механизмов, предложенная Л.В. Ассуром и получившая своё развитие в работах И.И. Артоболевского.

Согласно этой классификации, любой плоский механизм может быть образован из механизма первого класса путем присоединения к нему структурных групп Ассура.

Для удобства структурного анализа строится **структурная условная схема механизма**. Она имеет следующие особенности:

- структурная схема механизма строится без учета масштаба длин;
- все поступательные кинематические пары заменяются вращательными парами;
- звенья, входящие в две кинематические пары, изображают линией; звенья, входящие в три кинематические пары, изображают заштрихованным треугольником; звенья, входящие в четыре кинематические пары, изображают заштрихованным четырехугольником и т.д. Форма и размеры заштрихованных фигур значения не имеют;
- при вычерчивании структурной схемы механизма следует располагать звенья так, чтобы отсутствовали пересечения линий звеньев;

- при построении структурной схемы рекомендуется сохранить на ней те же буквенные обозначения кинематических пар и нумерацию звеньев, которые имелись на кинематической схеме или схеме заменяющего механизма.

Структурная схема механизма используется только для исследования структуры (строения) механизма и ее не используют для исследования движения звеньев.

Начальным механизмом (механизмом первого класса) называют ведущее звено, соединённое кинематической парой со стойкой.

Группой Ассура называется открытая кинематическая цепь, которая при присоединении свободными элементами звеньев к стойке будет иметь нулевую степень подвижности ($W=0$), а после присоединения к механизму не изменит его числа степеней подвижности. Группа Ассура не может быть разбита на несколько кинематических цепей с нулевой степенью подвижности.

Структурная формула группы Ассура имеет вид

$$W = 3n - 2P_5 = 0$$

или
$$P_5 = \frac{3}{2}n \quad (4.1)$$

Из уравнения (1) следует, что число звеньев в группе Ассура должно быть четным, а число пар пятого класса – кратно трём. Возможные следующие сочетания количества звеньев и кинематических пар показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Сочетание чисел звеньев и кинематических пар групп Ассура

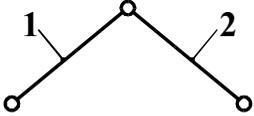
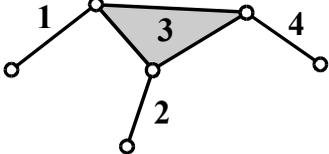
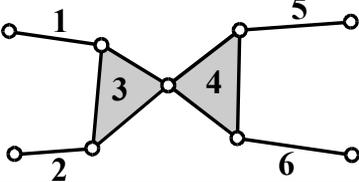
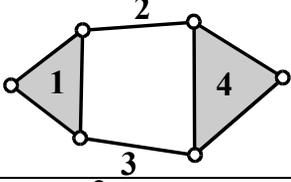
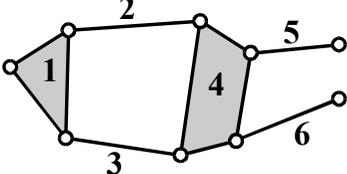
n	2	4	6	8	...
P_5	3	6	9	12	...

Класс контура структурной группы определяется числом кинематических пар, образующих наиболее сложный не-

зависимый замкнутый контур кинематической цепи группы, **порядок** группы – числом кинематических пар, которыми она присоединяется к механизму. Класс механизма определяется классом наиболее сложной, входящей в состав на кинематической цепи, структурной группы (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Класс и порядок групп Ассура

Структурная схема группы	Число звеньев	Число пар P_5	Класс группы	Порядок группы
	2	3	2	2
	4	6	3	3
	6	9	3	4
	4	6	4	2
	6	9	4	3

Для определения класса механизма его необходимо расчленить на структурные группы и начальный механизм, начиная с самой удаленной от ведущего звена пары. При этом должно соблюдаться условие, что при отчленении структурной группы число степеней подвижности оставшейся части кинематической цепи не изменяется. На кинематических схемах в зависимости от сочетания вращательных и поступательных пар и взаимного их расположения все группы Ассур второго класса делятся на 5 видов (рис. 4.1).

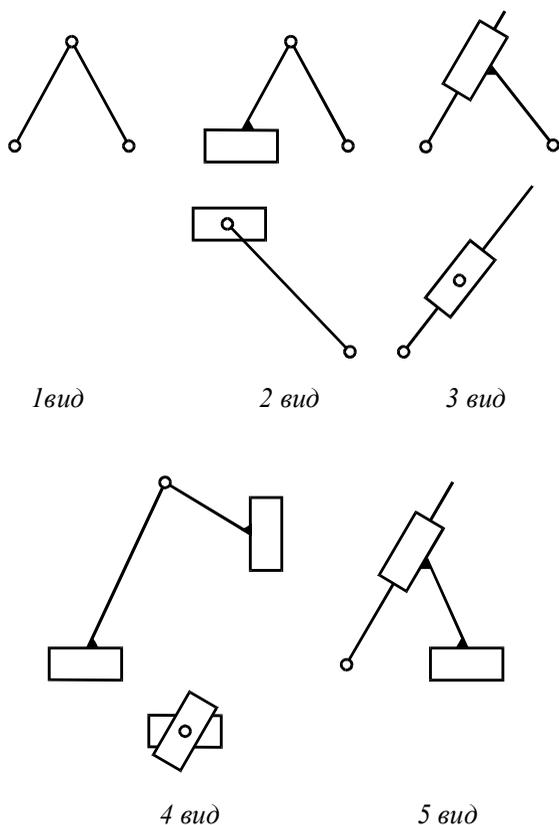


Рис. 4.1. Виды групп Ассур второго класса

4.2. Порядок отсоединения структурных групп Ассура:

1. Начинать отсоединение структурной группы нужно с участка механизма, наиболее удаленного от ведущего звена (ведущих звеньев). Вначале нужно попытаться отделить самую простую группу, состоящую из двух звеньев и трех кинематических пар, то есть группу второго класса. При этом оставшаяся после отсоединения структурной группы кинематическая цепь должна быть механизмом с прежней степенью подвижности. Не должно быть не присоединенных звеньев.

2. Если при отсоединении структурной группы второго класса перечисленные условия не выполняются, то следует попытаться отделить более сложную группу (более высокого класса) до выполнения перечисленных условий.

3. Отчленение от механизма структурных групп Ассура ведут последовательно, приближаясь к ведущему звену (ведущим звеньям).

После отсоединения всех структурных групп Ассура должно остаться одно ведущее звено (одни ведущие звенья).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством предложенного плоского или пространственного механизма. Медленно вращая ведущее звено, проследить движение остальных звеньев. Найти неподвижные элементы кинематических пар. Выбрать положение механизма, при котором лучше всего видно относительное расположение звеньев.
2. Начертить кинематическую схему механизма. Первоначально выполнить на черновике эскиз схемы механизма. Пронумеровать все звенья арабскими цифрами. Стойку обозначить цифрой 0, а ведущее звено – цифрой 1.
3. Обозначить все кинематические пары заглавными буквами латинского алфавита. Составить таблицу кинематических пар.
4. Произвести необходимые и начертить кинематическую схему в выбранном масштабе длин, руководствуясь материалами лабораторной работы № 1.

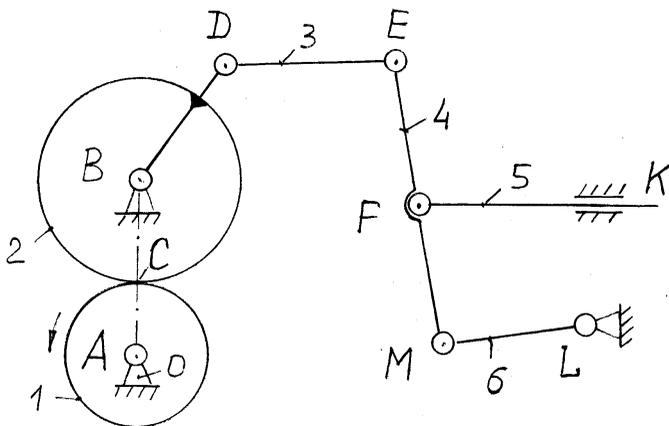


Рис. 4.3. Кинематическая схема кислородного насоса

3. Обозначаем кинематические пары заглавными буквами латинского алфавита, Ставим на схеме номера всех звеньев и указываем стрелкой направление вращения ведущего звена. Составляем таблицу кинематических пар (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Таблица кинематических пар

Обозначение кинематической пары	Наименование кинематической пары	Звенья, входящие в пару
A	Вращательная низшая	0, 1
B	Вращательная низшая	0, 2
C	Высшая	1, 2
D	Вращательная низшая	2, 3
E	Вращательная низшая	3, 4
F	Вращательная низшая	4, 5
K	Поступательная низшая	0, 5
M	Вращательная низшая	4, 6
L	Вращательная низшая	0, 6

4. Данный механизм является плоским. Определяем степень подвижности механизма по формуле (2.2). Для него имеем: $n = 6$; $P_5 = 8$ (A, B, D, E, F, K, M, L); $P_4 = 1$ (C).

$$W = 3 \times n - 2 \times P_5 - P_4 = 3 \cdot 6 - 2 \cdot 8 - 1 = 1.$$

5. Строим схему заменяющего механизма (рис. 4.4), так как механизм содержит высшую кинематическую пару C.

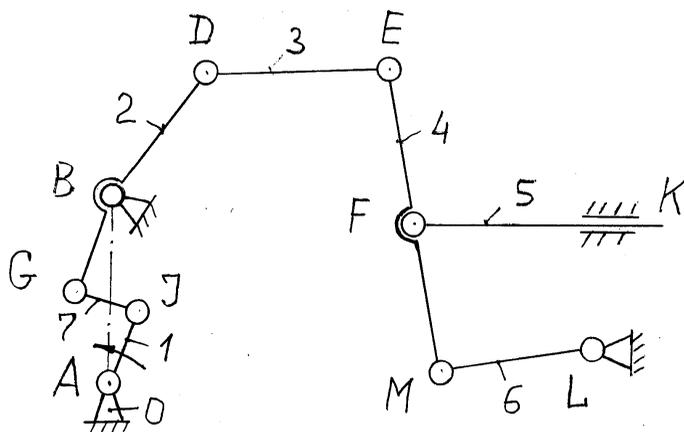


Рис. 4.4. Схема заменяющего механизма

6. Строим структурную схему механизма (рис.22).

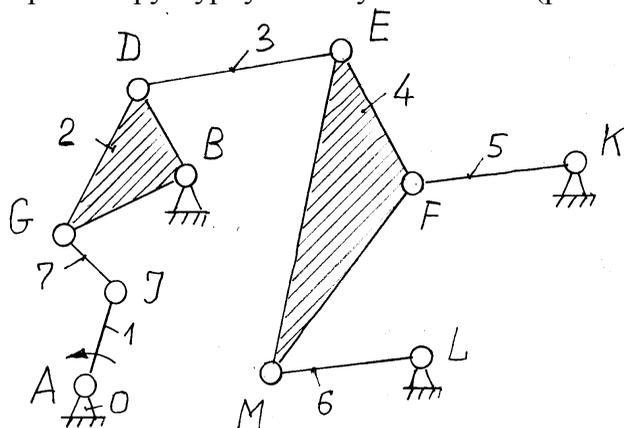


Рис. 4.5. Структурная схема механизма кислородного насоса

7. Вычленим от механизма структурные группы Ассура и изображаем все группы в отдельном виде; отдельно изображаем ведущее звено со стойкой. Отделить вначале от механизма структурную группу Ассура второго класса не удастся, так как после отсоединения такой группы схема механизма разывается на две части и не остается механизм с прежней степенью подвижности, равной единице. Поэтому отделяем структурную группу Ассура третьего класса, содержащую четыре звена (3, 4, 5 и 6) и шесть кинематических пар: D, E, F, K, M, L (рис. 4.6, а).

После отсоединения этой структурной группы остался четырехзвенный механизм $AJGB$. Для него имеем: $n = 3; P_5 = 4 (A, J, G, B); P_4 = 0 (C)$.

Степень подвижности структурной группы:

$$W = 3 \times n - 2 \times P_5 - P_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1.$$

Степень подвижности осталась прежней, поэтому отделение структурной группы Ассура выполнено верно.

Далее отсоединяем структурную группу Ассура второго класса, содержащую два звена (2 и 7) и три кинематические пары: B, G, J (рис. 4.6, б). После отсоединения этой структурной группы остается начальный механизм (механизм первого класса), состоящий из ведущего звена 1, соединенного в кинематическую пару A со стойкой 0 (рис. 4.6, в). Для него имеем: $n = 1; P_5 = 1 (A); P_4 = 0$.

Степень подвижности начального механизма:

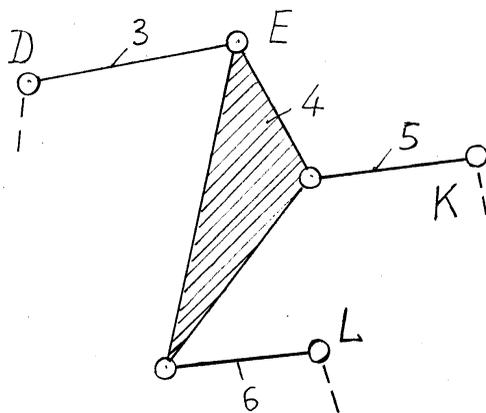
$$W = 3n - 2p_H - p_B = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 - 0 = 1.$$

Степень подвижности осталась прежней, поэтому отделение структурной группы выполнено верно.

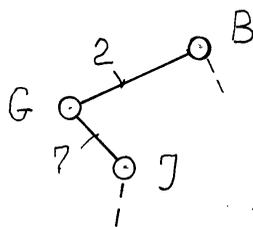
8. Формула строения данного механизма имеет вид:

$$I (0, 1) \rightarrow II (7, 2) \rightarrow III (3, 4, 5, 6).$$

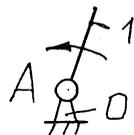
9. Так как наивысший класс структурных групп Ассура, входящих в состав механизма, третий, то класс данного механизма третий.



а)



б)



в)

Рис. 4.6. Схемы отделенных от механизма кислородного насоса: а) структурная группа Ассура III класса; б) структурная группа Ассура II класса; в) начальный механизма I класса

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью выполняется структурный анализ механизма?
2. Кто сформулировал основной принцип образования механизмов?
3. В чем состоит основной принцип образования механизмов?
4. Что называют структурной группой Ассура?
5. Какова последовательность структурного анализа механизма?

6. Что называется структурной формулой механизма?
7. Какие схемы строят при структурном анализе механизма?
8. С какой целью и как строится схема заменяющего механизма?
9. С какой целью и как строится структурная схема механизма?
10. Какой вид имеют структурные группы Ассура?
11. Как определяется класс, порядок и вид структурных групп?
12. Для чего механизм разбивается на структурные группы?
13. В какой последовательности при структурном анализе от механизма отчленяют структурные группы Ассура?
14. Какой вид имеет формула строения механизма?
15. Где используют формулу строения механизма?
16. Как определяется класс механизма?
17. Где используют класс механизма?

Библиографический список

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин : учебник для втузов / И. И. Артоболевский. – М. : Альянс, 2012. – 640 с.
2. Муравьев В. А. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин : учеб. -метод. пособие / В. А. Муравьев, Ю. Ф. Устинов, В. А. Жулай и др. Воронеж : Воронежский ГАСУ, 2013. – 200 с.
3. Тимофеев Г. А. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для бакалавров / Г. А. Тимофеев. – М. : Юрайт, 2013. - 351с.
4. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование : учеб. пособие / под ред. Г. А. Тимофеева и Н. В. Умнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. - 154 с.
5. Борисенко Л. А. Теория механизмов, машин и манипуляторов : учеб. пособие / Л. А. Борисенко. - М. : НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2013. - 285 с.
6. Коловский М. З. Теория механизмов и машин : учеб. пособие / М. З. Коловский [и др.]. - М. : ИЦ Академия, 2013. - 560 с.
7. Матвеев Ю. А. Теория механизмов и машин : учеб. пособие / Ю. А. Матвеев, Л. В. Матвеева. - М. : Альфа-М, ИНФРА-М, 2011. – 320 с.
8. Чмиль В. П. Теория механизмов и машин : учеб. -метод. пособие / В. П. Чмиль. – СПб. : Лань, 2012. – 288 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. Лабораторная работа № 1 Построение кинематических схем плоских и пространственных механизмов.....	4
1.1. Основные понятия и определения	4
1.2. Порядок выполнения работы	11
1.3. Пример выполнения	12
2. Лабораторная работа № 2 Определение степени подвижности механизма.....	14
2.1. Основные понятия и определения	14
2.2. Порядок выполнения работы	18
2.3. Пример выполнения	19
3. Лабораторная работа № 2 Замена в плоских механизмах высших кинематических пар низшими.....	21
3.1. Основные понятия и определения	21
3.2. Некоторые частные случаи замены высших пар.....	25
3.3. Порядок выполнения работы	26
3.4. Пример выполнения	26
4. Лабораторная работа № 3 Структурный анализ плоских и пространственных механизмов	30
4.1. Порядок отсоединения структурных групп Ассура:	34
4.2. Пример выполнения	35
Библиографический список.....	41

Структурный анализ механизмов
Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Теория механизмов и машин» для студентов
специальностей 190600 «Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов»,
190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
190109 «Наземные транспортно-технологические средства»

Составители: Муравьёв Владимир Александрович
Жилин Роман Анатольевич

Подписано в печать 4.06.2016. Уч.-изд. л. 2,6.

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября,84